

# **Untersuchung der Anwendungsmöglichkeiten mikrovaristorgefüllter Feldsteuerelemente in der elektrischen Energietechnik**

Vom Fachbereich 18  
- Elektrotechnik und Informationstechnik -  
der Technischen Universität Darmstadt

zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

## **Dissertation**

von  
**Dipl.-Ing. Jan-Oliver Debus**  
geboren am 8. Dezember 1981 in Haiger

Referent: Prof. Dr.-Ing. Volker Hinrichsen

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat

Tag der Einreichung: 07. 07. 2014

Tag der mündlichen Prüfung: 02. 12. 2014

D17  
Darmstadt 2015



# Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Hochspannungstechnik der Technischen Universität Darmstadt. Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Volker Hinrichsen, der mich als Doktorvater während des Forschungsprojektes stets hervorragend unterstützt hat.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat vom Institut für Hochspannungstechnik und elektrische Energieanlagen der TU Braunschweig danke ich für die bereitwillige Übernahme des Korreferats sowie seine Hinweise und Kommentare während der Durchsicht dieser Arbeit.

Besonders danke ich der AiF „Otto von Guericke“.V.“sowie den Projektpartnern, die das Forschungsvorhaben im Rahmen des AiF Projektes 15455 N nicht nur tatkräftig sondern auch finanziell unterstützt haben. Hervorheben möchte ich die Herren Stephan Arndt, Gerald Jacob, Firma Cellpack, Michael Hagemeister, ABB Schweiz AG, Andreas Lutz, Von Roll AG, Dr.-Ing. Jens M. Seifert, LAPP Insulators, die mich fachlich hervorragend beraten haben und durch ihre Unterstützung die Fortführung des genannten Projektes ermöglichten.

Den Werkstattmitarbeitern des Fachgebiets Horst Graulich, Christian Homa, Stefan Noll, Frank Ullrich und Ulrich Veith danke ich ausdrücklich für die tatkräftige Unterstützung, welche die Umsetzung meiner Ideen erst möglich gemacht hat.

Des weiteren danke ich meinen ehemaligen Kollegen am Fachgebiet für die gute Zusammenarbeit. Insbesondere möchte ich meinem ehemaligen Bürokollegen Sebastian Suchanek für gute Ratschläge und Ermunterungen sowie den Herren Michael Tenzer und Max Tuczek für manche anregende Diskussion danken.

Ebenso danke ich allen Studenten, die in Form von studentischen Arbeiten sowie durch die umfangreichen HiWi-Tätigkeiten an diesem Forschungsprojekt beteiligt waren und zu seinem Gelingen beigetragen haben.

Ganz besonders möchte ich meiner Familie danken. Meinen Eltern danke ich, da ihnen meine Ausbildung stets am Herzen lag und sie mir somit die Promotion erst ermöglicht haben. Besonders herzlich danke ich meiner Frau Julia für ihre Unterstützung, ihr Vertrauen und den Rückhalt, den sie mir während des Entstehens dieser Arbeit gegeben hat.

Darmstadt, im Juni 2014



# Kurzfassung

Aktuelle Feldsteuertechnologien weisen zum Teil technische oder ökonomische Nachteile auf, die die Entwicklung neuer Innovationen rechtfertigen. Eine solche neuartige Technologie stellen mikrovaristorgefüllte Polymere dar.

Deren Charakterisierung hat gezeigt, dass die elektrischen Eigenschaften im Wesentlichen durch deren Schaltpunkt bestimmt werden. Dagegen hängt das mechanische und thermische Verhalten auch von den verwendeten Polymeren ab. So zeigen z.B. gefülltes Silikon und Phenolharz zum Teil unterschiedliches temperaturabhängiges Verhalten. Diese wechselseitige Abhängigkeit stellt aber nicht zwangsläufig einen Nachteil für die jeweilige Anwendung dar.

Für die elektrische Charakterisierung von mikrovaristorgefüllten Polymeren muss deren stark nichtlineare  $U$ - $I$ -Kennlinie besonderes berücksichtigt werden. Dabei zeigen sich grundsätzliche Unterschiede sowohl bei der Verwendung von genormten Schutzringanordnungen als auch bei der Auswertung von Wechsel- und Gleichspannungskennlinien. So ist z.B. bei Wechselspannung eine phasenaufgelöste Bestimmung von resistivem und kapazitivem Stromanteil notwendig. In beiden Fällen ist die Kennlinie zudem abhängig von der Messtemperatur und -dauer.

Mikrovaristorgefüllte Phenolharzlacke mit einem Schaltpunkt von  $E_b = 5 \text{ kV/cm}$  sind grundsätzlich geeignet, als mögliche resistive Feldsteuerung in einem Enden-  
glimmschutzsystem eingesetzt zu werden. Sie zeigen sowohl elektrisch als auch thermisch ein besseres Verhalten als vergleichbare Systeme, die SiC-gefüllt sind.

An Verbundlangstabisolatoren werden erstmals mikrovaristorgefüllte Feldsteuer-elemente untersucht. Besonders geeignet haben sie sich zur lokalen Feldsteuerung gezeigt. So konnte das Einsetzen von Wassertropfenkorona während Wechselspannungsversuchen unter Regen reduziert werden. Hier haben sich neue Einsatzmöglichkeiten gezeigt, die aufgrund der stark nichtlinearen Kennlinie und den damit verbundenen Effekten möglich werden. Globale Steuerungen der Potentialverteilung längs des Isolatorstrunks sind mit den untersuchten mikrovaristorgefüllten Silikonen nicht beobachtet worden.

Für einen direkten Freilufteinsatz ist das mikrovaristorgefüllte Silikon aufgrund seines hohen Füllgrades und der damit begrenzten Krichstrombeständigkeit nicht geeignet. Darum wurden Isolatoren mit einem doppeltexturierten Strunk untersucht, der neben der mikrovaristorgefüllten Schicht aus einer zusätzlichen konventionellen

Silikonhülle besteht. Diese konnten erfolgreich getestet werden, wenn auch die beobachteten Effekte nicht so deutlich wie bei reinen mikrovaristorgefüllten Strüngen ausfielen.

Feldsteuerelemente für Mittelspannungsendverschlüsse werden als weitere Anwendung für mikrovaristorgefülltes Silikon untersucht. Im Vergleich mit konventionellen Steuerungen zeigen sie vor allem Vorteile bei der Begrenzung von hohen Überspannungen.

Zur Beurteilung der Wirksamkeit mikrovaristorgefüllter Feldsteuersysteme können Feld- und Potentialmesstechniken nur bedingt eingesetzt werden, da die Feldsonden einen zu starken Einfluss auf die Prüflinge haben oder nur einen limitierten Bereich darstellen können, der weit unter den real auftretenden Feldstärken liegt. Zuverlässige Messungen konnten nur bei den dünnen Anstrichen der EGS-Systeme erreicht werden.

Die Feldmessung an einem Verbundisolator ist dagegen kaum umzusetzen, da keine geeignete Feldsonden zur Verfügung stehen, mit denen ausreichend rückwirkungsfrei gemessen werden kann.

Gerade bei den eingesetzten Feldsteuerschläuchen und den Endenglimmschutzlacken haben sich thermografische Untersuchungen bewährt, die aufgrund der entstehenden Erwärmung deutlich zeigen können, in welchen Bereichen ein Material leitfähig wird. Bei beiden Anwendungen wurden keine Ausfälle mikrovaristorgefüllten Polymere aufgrund der Erwärmung beobachtet.

Eine Variation der Schaltpunkte  $E_b$  mikrovaristorgefüllter Polymere muss anwendungsabhängig durchgeführt werden. Möglichst niedrige Schaltpunkte sind für den Einsatz der lokalen Feldsteuerung an Verbundisolatoren besonders interessant. Sie sind notwendig, um die benötigten Effekte bei den im Vergleich zu den Feldsteuerungen bei den Gleitanordnungen niedrigen Feldstärken zu erreichen. Während bei den Endenglimmschutzsystemen ein Schaltpunkt von  $E_b = 500 \text{ V/mm}$  sehr gute Ergebnisse erzielt hat, scheint dagegen bei den Kabelgarnituren ein Schaltpunkt von  $E_b = 1200 \text{ V/mm}$  ausreichend zu sein, um auftretende Feldstärken ausreichend zu begrenzen. Zudem erlaubt er gegenüber einem geringeren Schaltpunkt kompaktere Feldsteuerelemente.

# Abstract

Current field control technologies exhibit some technical or economic disadvantages which justify the development of innovations. Microvaristor filled polymers represent such a novel technology.

Their characterization has shown that the electrical properties are essentially determined by the switching field strength. In contrast, the mechanical and thermal behaviour also depend on the polymers used. For example, various polymers like silicone rubber and phenolic resin partially show different temperature-dependent behaviour. This interdependence is not necessarily a disadvantage for the respective application.

The highly non-linear  $U$ - $I$ -characteristic of the microvaristor filled polymers has to be especially considered during their characterization. Fundamental differences appear both in the use of standardized guard ring assemblies and in the analysis of AC and DC characteristics. Thus, for example, for AC voltage a phase-resolved determination of resistive and capacitive current component is necessary. In both cases, the characteristic curve is also dependent on the measurement temperature and time.

Microvaristor filled phenolic resin coatings with a switching field strength of  $E_b = 5 \text{ kV/cm}$  have been shown to be suitable to be used as a potential resistive stress control in the outer corona protection of the windings in rotating electrical machines. They show both better electrical and thermal performance than comparable systems, which are filled with SiC.

For the first time composite long rod insulators with applied microvaristor filled field control elements are investigated. They show promising results especially for the *local* field control. The inception of discharges caused by water droplets could be reduced during AC tests with artificial rain. In this case, new applications become possible due to the highly non-linear characteristic and the related effects. However, *global* control of the potential distribution along the insulator shank have not been observed with the tested microvaristor filled silicones.

But microvaristor filled silicones are not suitable for outdoor applications due to their high degree of filling and a resulting reduced tracking and erosion resistance. Therefore insulators with a double extruded rod were studied, which combine a microvaristor filled layer with an additional conventional silicone sheath. These

designs were successfully tested, though the effects are not so clear like the ones, observed on the single extruded microvaristor filled rods.

Stress control elements for medium voltage cable terminations are investigated as a further application of microvaristor filled silicones. They are compared with conventional stress control systems and show especially advantages for the limitation of high impulse voltages.

To assess the effectiveness of microvaristor filled field control systems field and potential measurement techniques can be used only conditionally, since the field probes have a strong influence on the samples or may be applicable only for a limited field strength range, which is well below the field strength actually occurring. Reliable measurements could only be achieved in the thin coatings of corona protection systems on the windings.

The field measurement on a composite insulator, however, is difficult to implement because there are no suitable field probes available, which can be adequately applied without repercussion on the measurement.

Especially thermographic studies are well suitable for the investigation of the behaviour of the stress control systems both of the cable accessories and the windings of the rotating machine. Also in both applications, no failures of the microvaristor filled polymers were observed due to the heating.

A variation of the switching field strength  $E_b$  of microvaristor filled polymers must be performed depending on the application. Lowest possible switching field strengths are of particular interest for application of *local* stress control on the surface of composite insulators. These switching field strengths are lower in comparison to the ones used for cable accessories to allow the same field limiting effects. While the outer corona protection of a machine winding achieves very good results with a switching field strength of  $E_b = 500 \text{ V/mm}$ , a switching point of  $E_b = 1200 \text{ V/mm}$  seems to be sufficient to limit occurring field strengths of medium voltage cable terminations. The consequences of lower switching field strength are in this case longer stress control elements.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>iii</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>v</b>
<b>Abstract</b>	<b>vii</b>
<b>Abkürzungen</b>	<b>v</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>vii</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>2. Grundlagen der Feldsteuertechnik</b>	<b>7</b>
2.1. Wirkungsweise von Feldsteuerungen . . . . .	7
2.2. Prinzipien der Feldsteuerung . . . . .	7
2.2.1. Geometrische Feldsteuerungen . . . . .	8
2.2.2. Kondensatorsteuerungen (Kapazitive Steuerungen) . . . . .	8
2.2.3. Steuerung durch einen Impedanzbelag . . . . .	9
<b>3. Übersicht aktueller feldsteuernder Systeme</b>	<b>17</b>
3.1. Grundlegende Eigenschaften der verwendeten Polymere . . . . .	17
3.1.1. Silikonelastomere . . . . .	17
3.1.2. Phenolharze . . . . .	19
3.2. Füllstoffe für polymere Feldsteuermaterialien . . . . .	19
3.2.1. Carbon Black . . . . .	20
3.2.2. Siliziumcarbid . . . . .	23
3.2.3. Mikrovaristoren . . . . .	23
<b>4. Ausgewählte Anwendungsbeispiele für mikrovaristorgefüllte Polymere</b>	<b>33</b>
4.1. Verbundlangstabisolatoren . . . . .	33
4.2. Endenglimmschutz rotierender elektrischer Maschinen . . . . .	37
4.3. Feldsteuerungen in Mittelspannungskabelgarnituren . . . . .	39
4.4. Simulation der Anwendungen mikrovaristorgefüllter Feldsteuerelemente . . . . .	41

<b>5. Ziele der Arbeit</b>	<b>47</b>
<b>6. Charakterisierung nichtlinearer Materialien und Systeme</b>	<b>51</b>
6.1. Charakterisierung von Mikrovaristor-Pulvern . . . . .	52
6.2. Charakterisierung von plattenförmigen Silikon-Prüflingen . . . . .	53
6.2.1. Herstellung der Prüflinge . . . . .	53
6.2.2. Prüfaufbau zur Charakterisierung . . . . .	53
6.2.3. Gleichspannungscharakteristik . . . . .	56
6.2.4. Wechsellspannungscharakteristik . . . . .	58
6.2.5. Eigenschaften der Wechsellspannungskennlinie . . . . .	61
6.2.6. Unterschiede der Kennlinien bei Gleich- und Wechsellspannung	62
6.3. Materialeigenschaften mikrovaristorgefüllter Silikone . . . . .	63
6.3.1. Charakterisierung und mechanische Dehnung mikrovaristor- gefüllter Feldsteuerelemente . . . . .	63
6.3.2. Temperaturabhängigkeit der $E$ - $J$ -Kennlinie mikrovaristorge- füllter Silikone . . . . .	66
6.3.3. Kriechstromfestigkeit mikrovaristorgefüllter Silikone . . . . .	69
6.4. Zerstörungsmechanismen mikrovaristorgefüllter Silikone . . . . .	71
6.4.1. Betrachtungen zur Stromaufteilung der mikrovaristorgefüll- ten Platten . . . . .	71
6.4.2. Untersuchung der Durchschlagspannung und der Leistungs- aufnahme mikrovaristorgefüllter Silikone . . . . .	72
6.5. Temperaturabhängige Charakterisierung gefüllter Lacke . . . . .	74
6.6. Aussagekraft der vorgestellten Untersuchungen . . . . .	76
<b>7. Verbundlangstabisolatoren mit mikrovaristorgefüllten Silikonelemen- ten</b>	<b>79</b>
7.1. Übersicht der untersuchten Isolatormodelle . . . . .	79
7.2. Wirkung als lokale Feldsteuerung . . . . .	82
7.2.1. Versuche an Modellanordnungen . . . . .	82
7.2.2. Salznebelversuch an Isolatoren mit $U_m = 170$ kV . . . . .	93
7.2.3. Beregnungsversuche an Verbundisolatoren mit $U_m = 420$ kV	95
7.2.4. Beregnungsversuche an Verbundisolatoren mit $U_m = 170$ kV	100
7.2.5. Thermisches Verhalten der Verbundisolatoren mit $U_m = 170$ kV	103
7.3. Wirkung als globale Feldsteuerung . . . . .	103
7.3.1. Untersuchung der Überschlagspannung bei Wechsellspannung	104
7.3.2. Stoßspannungsversuche . . . . .	105
7.3.3. Messung der elektrischen Feldverteilungen . . . . .	109
7.4. Fazit der Anwendungsmöglichkeiten mikrovaristorgefüllter Silikon- elemente an Verbundisolatoren . . . . .	111

<b>8. Endenglimmschutz rotierender elektrischer Maschinen</b>	<b>113</b>
8.1. Übersicht der eingesetzten Wicklungsstabmodelle . . . . .	113
8.2. Untersuchung der Feld- und Potentialverläufe von Endenglimm- schutzsystemen . . . . .	114
8.2.1. Messung . . . . .	114
8.2.2. Simulation mikrovaristorgefüllter Endenglimmschutzsysteme	118
8.2.3. Bewertung der Messverfahren . . . . .	121
8.3. Thermisches Verhalten resistiver Endenglimmschutzsysteme . . . . .	122
8.4. Teilentladungsmessungen an Wicklungsstabmodellen . . . . .	127
8.5. Fazit der Anwendungsmöglichkeiten mikrovaristorgefüllter Enden- glimmschutzsysteme . . . . .	128
<b>9. Mittelspannungskabelgarnituren</b>	<b>129</b>
9.1. Beschreibung der untersuchten Modelle . . . . .	129
9.2. Untersuchung einer Mittelspannungsgarnitur mit mikrovaristorge- fülltem Feldsteuerelement . . . . .	131
9.3. Überschlagspannung mikrovaristorgefüllter Feldsteuerelemente . . .	133
9.4. Thermisches Verhalten mikrovaristorgefüllter Silikonelemente . . . .	134
9.5. Simulation mikrovaristorgefüllter Kabelgarnituren . . . . .	139
9.6. Fazit der Anwendungsmöglichkeiten mikrovaristorgefüllter Feld- steuerelemente . . . . .	142
<b>10. Anwendungsvergleich und Zusammenfassung</b>	<b>145</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>158</b>
<b>Eigene Veröffentlichungen</b>	<b>160</b>
<b>Normen</b>	<b>162</b>
<b>Anhang</b>	<b>165</b>
<b>A. Aufgebaute Prüflinge</b>	<b>165</b>
A.1. Prüflinge zur Charakterisierung . . . . .	165
A.2. Aufgebaute Verbundisolatoren . . . . .	167
A.3. Prüflinge zur Untersuchung mikrovaristorgefüllter Kabelgarnituren	170
<b>B. Prüfaufbauten und -parameter</b>	<b>175</b>
B.1. Prüfaufbauten zur Charakterisierung . . . . .	175
B.2. Prüfaufbauten zur Untersuchung der Verbundlangstabisolatoren . .	177
B.3. Aufbauten zur Untersuchung von Mittelspannungskabelgarnituren .	181

B.4. Prüfaufbauten zur Untersuchung der Endenglimmschutzsystem . .	182
<b>C. Weitere Ergebnisse</b>	<b>187</b>
C.1. Ergänzende Ergebnisse zu Kapitel 6 . . . . .	187
C.2. Ergänzende Ergebnisse zu Kapitel 7 . . . . .	189
C.3. Ergänzendes Ergebnis zu Kapitel 8 . . . . .	192
C.4. Ergänzende Ergebnisse zu Kapitel 9 . . . . .	195
<b>Lebenslauf</b>	<b>197</b>
<b>Erklärung laut § 9 PromO</b>	<b>199</b>



# Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
AGS	Außenglimmschutz
ATH	Aluminiumtrihydrat
BaTiO <sub>3</sub>	Bariumtitanat
EGS	Endenglimmschutz
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Monomer
FeO	Eisenoxid
FSE	Feldsteuerelement
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
HTV	Hochtemperatur vernetzendes Silikon
IPT	Schiefe-Ebene-Test (engl. Inclined-Plane-Test)
IR	Infrarot
LSR	Liquid Silicone Rubber
NTC	Negativer Temperaturkoeffizient (engl.: Negative Temperature Coefficient)
PbTiO <sub>3</sub>	Bleititanat
PbZrO <sub>3</sub>	Bleizirkonat
PE	Polyethylen
PF	Polyformaldehyd

<b>Abkürzung</b>	<b>Beschreibung</b>
PTC	Positiver Temperaturkoeffizient (engl.: Positive Temperature Coefficient)
RTV-1	Raumtemperatur vernetzendes, einkomponentiges Silikon
RTV-2	Raumtemperatur vernetzendes, zweikomponentiges Silikon
SiC	Siliziumcarbid
SIR	Silikonelastomere (engl. Silicone rubber)
SnO	Zinnoxid
SSV	Starke-Schröder-Voltmeter
VPE	Vernetztes-Polyethylen
VPI	Vacuum Pressure Impregnation
WC	Wettability Class
ZnO	Zinkoxid

# Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Beschreibung
$a_{\text{EGS}}$	mm	Dicke einer Endenglimmschutzbeschichtung
$a_{\text{Iso}}$	mm	Dicke der Isolation z.B. des Wicklungsstabmodells bzw. des Kabels
$\alpha$	-	Nichtlinearitätsexponent
$A_{\text{Messelektrode}}$	mm <sup>2</sup>	Fläche der Messelektroden
$\beta$	rad	Einfallswinkel des künstlichen Regens
$C_{\text{M}}$	F	Kapazität der äußeren Isolatorhülle
$C_{\text{Iso}}$	F	Kapazität der Isolierung des Kabels/EGS
$C_{\text{SSV}}$	F	Kapazität des Starke-Schröder-Voltmeters
$\delta$	mm	Eindringtiefe
$\delta U$	V	Spannungsfall an einer Kontaktstelle
$D_{\text{HS-Elektrode}}$	mm	Durchmesser Hochspannungselektrode
$D_{\text{Mess}}$	mm	Durchmesser Messelektrode
$d_{\text{Mess}}$	mm	Messabstand der Potentialmesssonden
$D_{\text{i,Schutzring}}$	mm	Durchmesser Schutzring
$D_{50}$	mm	Mittlerer Durchmesser der Mikrovaristorpartikel
$d_{\text{W}}$	m	Abstand der Leiterseilnachbildung von der Wand
$E_{\text{b}}$	V/mm	Durchbruchfeldstärke, Schaltpunkt
$E_{\text{max}}$	kV/mm	Effektivwert der maximalen elektrischen Feldstärke
$\varepsilon_{\text{mech}}$	%	Mechanische Dehnung der FSE und der Garnituren

Symbol	Einheit	Beschreibung
$\epsilon_r$	-	Relative Permittivität
$E_t$	kV/mm	Tangentiale elektrische Feldstärke
$F_A$	N	Anpresskraft
$\gamma$	cm/kV	Nichtlinearitätsexponent des Widerstandes
$h_L$	m	Höhe der Leiterseilnachbildung während der Prüfung
$\hat{i}_{\text{Ableit}}$	mA	Scheitelwert des Ableitstroms entlang der Isolatorhülle während einer Salznebelprüfung
$\hat{i}_{\text{kap}}$	A	Scheitelwert der kapazitiven Stromkomponente
$\hat{i}_{\text{peak}}$	A	Scheitelwert des Gesamtstromes
$\hat{i}_{\text{res}}$	A	Scheitelwert der resistiven Stromkomponente
$l_{\text{ül}}$	mm	Überlappung des EGS auf dem AGS
$l_s$	mm	Schlagweite eines Isolators
$l_i$	mm	Strunklänge des (Modell-)Isolators
$l_k$	mm	Kriechweg eines Isolators
$m'_{\text{Salz}}$	kg/m <sup>3</sup>	Salzgehalt während einer Salznebelprüfung
$m'$	l/cm <sup>2</sup>	Wasserdurchfluss während einer Beregnungsprüfung
$\Phi_S$	kV	Oberflächenpotential einer Isolier- oder Gleitanordnung
$P'_V$	mW/mm <sup>3</sup>	Im mikrovaristorgefüllten Polymer umgesetzte Verlustleistungsdichte
$\rho$	$\Omega \cdot \text{m}$	Spezifischer Widerstand
$\sigma$	S/m	Elektrische Leitfähigkeit
$\sigma_{\text{Regen}}$	S/m	Elektrische Leitfähigkeit des künstlichen Regens
$\tau_{\text{FSE}}$	s	Zeitkonstante eines Feldsteuerelements
$\theta$	°	Neigungswinkel der Schirmprofile
$t_{\text{Prüf}}$	min	Prüfdauer

Symbol	Einheit	Beschreibung
$T_{\text{amb}}$	°C	Umgebungstemperatur, (engl. ambient temprature)
$U_{\text{b}}$	V	Schaltspannung eines Mikrovaristors/einer Korngrenze
$\hat{u}_{\text{BIL}}$	kV	Bemessungsblitzstoßspannung
$\hat{u}_{\text{d50}}$	kV	Scheitelwert der mittleren Durchschlagspannung
$\hat{u}_{\text{d50,pos}}$	kV	Scheitelwert einer positiven Durchschlagspannung
$U_{\text{i}}$	kV	Einsetzspannung von Teilentladungen
$U_{\text{m}}$	kV	Maximale Spannung für Betriebsmittel
$U_{\text{n}}$	kV	Nennspannung des Betriebsmittels
$U_{\text{P}}$	kV	Effektivwert der Prüfspannung



# 1. Einleitung

Feldsteuerungen in Betriebsmitteln der elektrischen Energieversorgung können als das wichtigste Element des ganzen Isoliersystemes betrachtet werden, da sie vor allem an Grenzflächen mit äußerst geringen elektrischen Festigkeiten unzulässig hohe Feldstärken vermeiden müssen. Eine besondere Sorgfalt bei der Auslegung dieser Systeme ist daher sowohl für einen zuverlässigen Betrieb als auch erfolgreiche Prüfungen unabdingbar. Diese Grenzflächen treten zum Beispiel in Hochspannungsdurchführungen, Endverschlüssen, Muffen und Steckern in Kabelsystemen sowie in Wicklungsstäben und -drähten von rotierenden elektrischen Maschinen als sogenannte Gleitanordnungen auf. Sie liegt immer dann vor, wenn die Grenzfläche einer Hochspannungsisolation zu einem gasförmigen Isolierstoff im Bereich der geerdeten Elektrode schräg von elektrischen Feldlinien geschnitten wird und eine hohe kapazitive Verkopplung zur Hochspannungselektrode entsteht. Diese werden zudem durch die höhere relative Permittivität aus dem festen in den gasförmigen Isolierstoff verdrängt. Aufgrund der hohen elektrischen Festigkeit des Feststoffs erfolgt bei zu hoher Beanspruchung kein Durchschlag, sondern bereits bei sehr niedrigen Feldstärkebeanspruchungen ein Überschlag entlang der Oberfläche.

Zur Minimierung der elektrischen Feldstärken an einer Gleitanordnung setzt man häufig hoch permittiv oder leitfähig eingestellte Impedanzbeläge sowie abgerundete Elektroden zur geometrischen Feldsteuerung ein. Basismaterialien sind Silikone, EPDM oder aufschumpfbare Polyethylene. Die hohe Permittivität oder Leitfähigkeit wird in der Regel durch eine Füllung mit Ruß (sog. Carbon Blacks) oder SiC bewirkt. Diese Materialien sind allerdings aufgrund ihrer teils beträchtlichen thermischen und mechanischen Abhängigkeiten nicht unproblematisch. Die eingesetzten Systeme wirken sowohl lokal, indem sie den Einsatz von Teilentladungen unterdrücken, als auch global, da sie Überschläge bei anliegenden Prüfspannungen vermeiden. Im Gegensatz dazu treten an den Armaturen von Hohl- und Langstabisolatoren zu hohe Feldstärken aufgrund von zu geringen Radien der Elektrode auf. Gleichzeitig wird das Isolationsmaterial durch die nichtlineare Potentialverteilung längs der Oberfläche belastet. Klassischerweise werden diese Anordnungen durch großvolumige Schirmringe gesteuert.

Seit dem Jahr 2000 sind Mikrovaristoren bekannt, die als funktionale Füller eingesetzt werden können. Mikrovaristoren sind dotierte ZnO-(Zinkoxid-)Varistoren in

Pulverform mit Teilchendurchmessern von  $D \approx 10 - 200 \mu\text{m}$  [Gre04], [Don07]. Sie unterscheiden sich in ihrer Keramikstruktur nicht von herkömmlichen Varistoren, die in elektrischen Energieversorgungsnetzen oder der Elektronik als Überspannungsschutz eingesetzt werden. Diese werden in der Arbeit als Energievaristoren bezeichnet. Grundsätzlich lassen sich mit Mikrovaristoren Elastomere, Thermoplaste, Lacke oder Harze füllen sowie Bänder beschichten. Der Vorteil gegenüber SiC- und rußgefüllten Systemen ist die zu erwartende größere Stabilität der elektrischen Charakteristik, da sie eine intrinsische Eigenschaft des dotierten ZnO ist. Im Weiteren zeichnen sie sich aufgrund ihrer nichtlinearen Widerstandscharakteristik durch die Fähigkeit aus, Überspannungen zu begrenzen. Mikrovaristoren weisen je nach Herstellungsverfahren zudem eine sehr hohe relative Permittivität  $\epsilon_r = 300 - 1000$  auf. Es lassen sich in damit gefüllten Polymerwerkstoffen ähnlich hohe Dielektrizitätszahlen wie in einem rußgefüllten Material erzielen. Daraus resultieren z.B. äußerst wirksame refraktive Steuerungen für Kabelgarnituren mit zusätzlichen überspannungsbegrenzenden Eigenschaften. Diese können eine höhere Betriebszuverlässigkeit bei gleichzeitig kompakteren Designs ermöglichen.

Der Einstieg in die in dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungen ist im Zusammenhang mit dem AiF-Projekt 15 455 N definiert und durchgeführt worden. Im Rahmen dieses Projektes wurde der Fokus auf drei mögliche Anwendungen der mikrovaristorgefüllten Polymere in Mittelspannungsgarnituren, im Endenglimmschutz in rotierenden elektrischen Maschinen und in Verbundlangstabisolatoren gelegt. Außerdem wurden Untersuchungen der grundlegenden Charakteristika der mikrovaristorgefüllten Polymere durchgeführt. Parallel ist in diesem Projekt eine Dissertation entstanden, die sich mit den simulativen Problemen der mikrovaristorgefüllten Polymere beschäftigt [Wei11a]. Aus diesem Grund werden Simulationen nur am Rande durchgeführt. Die praktischen Untersuchungen wurden im Anschluss mit einzelnen Projektpartnern bilateral fortgeführt.

Zunächst wird eine Übersicht über die in der elektrischen Isolierstofftechnik eingesetzten Feldsteuertechnologien und deren theoretische Beschreibung gegeben. Die physikalischen Eigenschaften der eingesetzten Materialien werden im Anschluss beschrieben und mit den Eigenschaften der mikrovaristorgefüllten Polymere in Zusammenhang gestellt.

In Kapitel 6 werden die Anforderungen an die Mess- und Prüfmethodik der mikrovaristorgefüllten Polymere vorgestellt und definiert. In dieser Arbeit wird dabei erstmals eine Variation des Schaltpunktes der mikrovaristorgefüllten Polymere auf  $E_b = 500 \text{ V/mm}$  durchgeführt. Auf deren Basis werden die spezifischen nichtlinearen Charakteristika der mikrovaristorgefüllten Polymere dargestellt. Daraus werden Prüfeempfehlungen abgeleitet. Abgeschlossen wird das Kapitel mit ersten Ansätzen für Untersuchungen des Langzeitverhaltens.



---

In den weiteren Kapiteln werden dann die angesprochenen Anwendungsmöglichkeiten der mikrovaristorgefüllten Polymere näher untersucht. Dabei erfolgt jeweils eine besondere Berücksichtigung des Schaltpunktes. Für die Verbundlangstabisolatoren, die Endverschlüsse und die Endenglimmschutzsysteme wird gezeigt, ob die mikrovaristorgefüllten Polymere als lokale und auch als globale Feldsteuerung eingesetzt werden können. Abgeschlossen wird jedes Kapitel separat mit einem entsprechenden Fazit. Ergänzend wird bei den Endenglimmschutzsystemen und Feldsteuerelementen dargestellt, wie der Einsatz von leistungsfähigen Simulationstools die Feldsteuerungen in den Betriebsmitteln optimieren kann. Gleichzeitig werden aber auch deren Grenzen aufgezeigt, die teilweise durch aktuelle Entwicklungstrends abgedeckt sind. Besonders werden Methoden vorgestellt, die auf der Nachbildung der Materialien als dünne Schichten beruhen. Gerade solche Methoden sind anspruchsvoll und innovativ. Als Möglichkeiten zur Validierung dienen sowohl Feld- und Potentialmessungen als auch umfangreiche thermographische Methoden. Im Fazit wird ihre Anwendbarkeit beurteilt.

Die Verbundlangstabisolatoren mit mikrovaristorgefüllten Silikonen zeigen ein großes Einsatzpotential im Bereich lokaler Feldsteuerung. So kann wirkungsvoll ein Einsetzen der Wassertropfenkorona verhindert werden. Eingeschränkt auf den Bereich von Gleichspannungsanwendungen sind dagegen die Möglichkeiten im Bereich der Potentialsteuerung entlang des Langstabes. Vom Verhalten her können sie in diesem Bereich durchaus Vorteile gegenüber den bei Porzellanisolatoren bekannten leitfähigen Glasuren bieten.

Mittelspannungskabelgarnituren, die eine Warmschrumpftechnik auf PE-Basis verwenden, stellen bisher die einzige kommerzielle Anwendung dar, die mikrovaristorgefüllte Polymere als Feldsteuerung verwenden. Silikonaufschiebegarnituren sind ebenfalls ein ausgezeichnetes Anwendungsgebiet von mikrovaristorgefülltem Silikon. Durch ihren Einsatz können konventionelle Feldsteuerelemente ersetzt und das Design der Garnituren optimiert werden.

Der Endenglimmschutz in elektrischen Hochspannungsmaschinen wird durch Lacke und Gewebebänder umgesetzt, die aufgrund des Füllstoffes Siliziumcarbid über eine nichtlineare  $U$ - $I$ -Kennlinie verfügen. Die elektrischen Eigenschaften dieses Füllstoffes unterliegen starken Streuungen. Hier bieten Mikrovaristoren das Potential, diesen als rein resistive Feldsteuerung zu ersetzen. Zudem wird gezeigt, in wieweit sie in der Lage sind, das Isoliersystem im Wickelkopf kompakter zu gestalten.

Abschließend werden in Kapitel 10 die Einsatzmöglichkeiten der mikrovaristorgefüllten Polymere anwendungsübergreifend verglichen. Dabei werden die unterschiedlichen Einsatzgebiete der mikrovaristorgefüllten Polymere in einen gemeinsamen Kontext gestellt.



## **2. Grundlagen der Feldsteuertechnik**

### **2.1. Wirkungsweise von Feldsteuerungen**

Um eine hohe Lebensdauer von Isoliersystemen zu gewährleisten, müssen auftretende elektrische Felder sowohl global als auch lokal gesteuert werden [Chr10]. Ersteres ist essentiell, um die im Rahmen der Isolationskoordination notwendigen Spannungspegel halten zu können, was durch entsprechende Prüfungen nachzuweisen ist. Letzteres vermeidet vor allem während des Betriebes das Auftreten von Teilentladungen, die die Lebensdauer des Gerätes wesentlich herabsetzen.

Als lokale Feldsteuerungen werden Maßnahmen in hochspannungstechnischen Geräten bezeichnet, die hohe elektrische Feldstärken an Oberflächen, vor allem im Kontakt mit einer Elektrode verhindern. Dies sind vor allem sogenannte Tripel-Zonen, die sowohl hochspannungsseitig, z.B. an einer Isolatorarmatur, als auch erdseitig an einem geerdeten Außenleiter wie an den Enden von Kabeln oder im Wickelkopf elektrischer Maschinen auftreten können. Diese beiden letzten Anwendungen stellen klassische Gleitanordnungen dar. Feldsteuernde Maßnahmen müssen nun sowohl lokal das Auftreten von Teilentladungen unterdrücken als auch global wirken, um einen vollständigen Überslag zu vermeiden. Die Anforderungen an die lokale Feldsteuerung müssen während des ganzen Betriebes des Gerätes erfüllt werden.

Globale Feldsteuerungen steuern die Verteilung des elektrischen Potentials am kompletten Isoliersystem: Sie wirken also im Volumen. Im Wesentlichen wird durch sie versucht, die Potentialverteilung zwischen einer Hochspannungselektrode und einer Erdelektrode zu linearisieren. Globale Feldsteuerungen können sowohl dauerhaft für den Betrieb notwendig sein, z.B. als Steuerring eines Isolators, als auch kurzfristig während einer dielektrischen Prüfung des Gerätes. Ein typisches Beispiel hierfür ist der feldstärkeabhängige Endenglimmschutz rotierender elektrischer Maschinen.

### **2.2. Prinzipien der Feldsteuerung**

Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über die einzelnen Feldsteuerprinzipien gegeben. Allen Prinzipien ist dabei gemein, dass sie durch eine Verminderung des

Impedanzbelages auf der Isolierstoffoberfläche für eine Linearisierung der Potentialverteilung sorgen. Dies erfolgt rein kapazitiv bei geometrisch- und kondensatorgesteuerten Geräten sowie durch einen zusätzlichen Impedanzbelag auf der Isolation bei refraktiven und (nichtlinear-)resistiven Steuerungen. Während für Wechselspannungsanwendungen prinzipiell alle vorgestellten Technologien eingesetzt werden können, sind nur (nichtlinear-)resistive Feldsteuerungen bei Gleichspannung uneingeschränkt anwendbar. Eine vertiefende Übersicht kann [Wei08c], [Eig08], [Küc09], [Eig11] und [Hin11] entnommen werden.

### 2.2.1. Geometrische Feldsteuerungen

Geometrische Feldsteuerungen werden durch große Radien der jeweiligen Elektrode realisiert. Sie werden in Form von Steuerringen als globale Steuerung eingesetzt, die an Hänge- und Stützisolatoren die Koppelkapazität zur Hochspannungsleitung erhöhen und so eine Linearisierung der Potentialverteilung bewirken. An einem Verbundlangstabisolator vermeiden sie in Kombination mit den verrundeten Armaturen zudem hohe Feldstärken am Übergang von Armatur und Strunk, der sich dann im Feldschatten des Steuerrings befindet. Dagegen werden leitfähige Deflektoren in Kabelgarnituren eingesetzt, um die Tripel-Zone durch eine Aufweitung des Feldstärkeverlaufs zu entlasten. Ausgeführt werden können sie z.B. durch ein leitfähiges Silikon oder Ethylen-Propylen-Dien-Monomer (EPDM) zur Applikation auf einem Vernetztes-Polyethylen (VPE)-Kabel oder durch Blei- oder Aluminiumelektroden bei Öl-Papier-Kabeln. Wurden früher gezielt Borda- oder Rogowskiprofile eingesetzt, erlauben heute computergestützte Feldsimulationen eine zunehmend optimalere Anpassung der Elemente an das einzelne Gerät. Generell sind sie für alle Spannungsebenen einsetzbar, aber für Mittelspannungsgarnituren  $U_n \leq 52 \text{ kV}$  meist zu aufwendig [Str01a], [Wei08c] und [Eig11].

### 2.2.2. Kondensatorsteuerungen (Kapazitive Steuerungen)

Kondensatorsteuerungen bzw. Kapazitive Steuerungen werden in Durchführungen aller Art, in Kabelgarnituren und früher auch im Endenglimmschutz rotierender elektrischer Maschinen eingesetzt. Sie werden durch leitfähige Beläge auf schwebendem Potential aufgebaut, die eine Reihenschaltung von Kapazitäten darstellen, entsprechend derer sich das Potential aufteilt. Sie werden dabei in die Isolation einer Garnitur bzw. einer Durchführung gewickelt. Dementsprechend aufwendig ist zwar ihre Applikation, aber sie erlauben eine nahezu lineare Spannungsaufteilung entlang der Isolationsoberfläche des so aufgebauten Stresskonus und sind in allen Spannungsebenen einsetzbar. Vorteilhaft ist zudem der relativ kompakte Aufbau innerhalb der Isolation. Für eine Auslegung eines Einsatzes unter Gleich-

spannung muss allerdings der Widerstand zwischen den Belägen berücksichtigt werden [Küc09], [Hin11].

### 2.2.3. Steuerung durch einen Impedanzbelag

Die Steuerung des elektrischen Feldes an der Oberfläche einer Gleitanordnung kann durch einen hochpermittiv und/oder resistiv eingestellten Impedanzbelag äußerst kompakt erfolgen, wie **Abbildung 2.1** exemplarisch verdeutlicht.

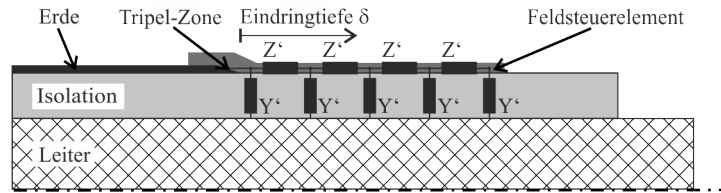


Abbildung 2.1.: Modell einer typischen, zylinderförmigen Gleitanordnung mit einem feldsteuernden Impedanzbelag (frei nach [Lup94], [Küc09]).

$\epsilon_{\text{FSE}}$ : relative Permittivität des FSE,

$\sigma_{\text{FSE}}$ : Leitfähigkeit des FSE,

$Z'$ : Impedanzbelag des FSE,

$\epsilon_{\text{I}}$ : relative Permittivität der Isolation,

$\sigma_{\text{I}}$ : Leitfähigkeit der Isolierung,

$Y'$ : Admittanzbelag der Isolierung,

$\delta$ : Eindringtiefe (Erläuterungen s. Text).

Ersterer wird meist refraktive Feldsteuerung genannt, da er sich durch die Brechung des elektrischen Feldes an der Grenzfläche zweier Dielektrika unterschiedlicher relativer Permittivität erklären lässt (siehe Gleichung 2.1). Das Feldsteuerelement (FSE) verfügt über eine gegenüber einem klassischen Isoliermaterial ( $\epsilon_{\text{r,I}} = 2,3\text{--}4$ ) sehr hohe relative Permittivität  $\epsilon_{\text{r,FSE}} = 10\text{--}20$ . Die elektrischen Feldlinien werden zwar an der Grenzschicht Isolation-Feldsteuerelement zur Tripel-Zone hin gebrochen (siehe **Abbildung 2.2**), betragsmäßig aber stark reduziert, was einer Aufweitung der Äquipotentiallinien und einer Entlastung der Tripel-Zone entspricht.

$$\frac{\tan(\alpha_{\text{I}})}{\tan(\alpha_{\text{FSE}})} = \frac{E_{\text{n,FSE}}}{E_{\text{n,I}}} = \frac{\epsilon_{\text{r,I}}}{\epsilon_{\text{r,FSE}}} \quad (2.1)$$

Resistive Feldsteuerungen lassen sich meist nicht sinnvoll feldtheoretisch durch ein zu Gleichung 2.1 äquivalentes Gesetz in Abhängigkeit der Leitfähigkeiten beschreiben, da sie nur als dünne Schichten aufgetragen werden müssen und dementsprechend kompakte Designs ermöglichen. Der Steuerbelag ist im Vergleich zur Isolation aber sehr leitfähig, so dass die Anordnung einen Kettenleiter bildet, der sich besser durch diskrete Elemente nachbilden lässt [Riv98] und entsprechend in

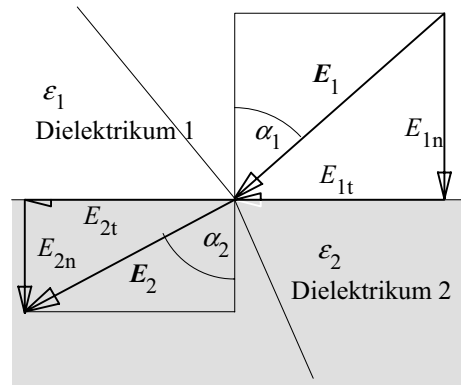


Abbildung 2.2.: Brechung der elektrischen Feld- und Potentiallinien an der Grenzfläche zweier schräg geschichteter Dielektrika (Quelle: [Küc09])

Abbildung 2.1 durch Längsimpedanzen und Queradmittanzen dargestellt ist. In diesem Modell werden tangentielle Ströme in der Isolation vernachlässigt, wodurch das elektrische Feld als tangential an der Oberfläche angenommen werden kann. Da die Zeitkonstante  $\tau_{\text{FSE}}$  des FSE (Gleichung 2.2) und die Kreisfrequenz  $\omega$  der anliegenden Spannung bestimmen, ob sich das Material resistiv ( $\omega\tau_{\text{FSE}} \ll 1$ ) oder kapazitiv ( $\omega\tau_{\text{FSE}} \gg 1$ ) verhält, können die grundlegenden Betrachtungen beider Steuerprinzipien unter der Voraussetzung, dass es sich um lineare Materialien handelt, analog erfolgen. Als Maß für die Ausnutzung der Feldsteuerschicht führt [Rhy97] eine Eindringtiefe  $\delta$  ein, die eine einfache Beurteilung der Wirkungsweise refraktiver bzw. resistiver Steuerungen ermöglicht:

$$\tau_{\text{FSE}} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{\text{r,FSE}}}{\sigma_{\text{FSE}}} \quad (2.2)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{A_{\text{FSE}} \cdot \sigma_{\text{FSE}}}{C'_1} (\tau_{\text{FSE}} + \omega^{-1})} \quad (2.3)$$

$$\omega\tau_{\text{FSE}} \gg 1 \quad (2.4)$$

$$\delta_{\text{ref}} = \sqrt{\left( \frac{A_{\text{FSE}}}{C'_1} \varepsilon_0 \varepsilon_{\text{r,FSE}} \right)} \quad (2.5)$$

$$\omega\tau_{\text{FSE}} \ll 1 \quad (2.6)$$

$$\delta_{\text{res}} = \sqrt{2 \cdot \left( \frac{A_{\text{FSE}}}{C'_1} \frac{\sigma_{\text{FSE}}}{\omega} \right)} \quad (2.7)$$

$A_{\text{FSE}}$  : Querschnittsfläche FSE

$C'_1$  : Kapazitätsbelag der Isolierung

Für lineare Materialien beschreibt  $\delta$  physikalisch die Länge des Feldsteuerelementes (siehe Abbildung 2.1), bei der eine anliegende Spannung  $U_0$  auf den Wert  $U(\delta)/U_0 = 1/e$  abgesteuert wird. Es ist offenkundig, dass sie bei beiden Arten der Steuerung von der anliegenden Spannung unabhängig ist. Refraktive Steuerungen sind zudem frequenzunabhängig (Gleichung 2.5). Zudem zeigen sich zwei wichtige Aspekte refraktiver Steuerungen: Zum einen bewirkt eine einfache Verlängerung des FSE keine effektivere Feldsteuerung und zum anderen können zu hohe relative Permittivitäten die Eindringtiefe soweit vergrößern, dass die hohen Feldstärken an das Ende des Feldsteuerelementes verlagert werden. Dagegen sind resistive Steuerungen (Gleichung 2.7) sehr wohl frequenzabhängig. Eine exakte Einstellung der notwendigen Leitfähigkeit ist schwierig, da nicht nur bei Betriebsspannung dauerhaft Teilentladungen unterdrückt, sondern auch bei der höchsten Prüfwechselspannung Gleitentladungen bzw. Überschläge bei Bemessungsblitzstoßspannung in einer Typprüfung vermieden werden müssen. Außerdem treten bei einer zu hohen Leitfähigkeit weiterhin hohe Feldstärken am Ende des Steuerbelages auf. Ist sie dagegen zu gering, erfolgt gar keine Steuerung. Analytisch lassen sich bei beiden Steuerungstechniken Potential- und Feldverläufe bestimmen, da es sich systemtheoretisch um einen Kettenleiter handelt (nach [Riv98]).

$$U(x) = U_0 \cdot \left[ 1 - \frac{\cosh[\gamma(x-L)]}{\cosh(\gamma L)} \right] \quad (2.8)$$

$$E(x) = \frac{dU}{dl} = U_0 \gamma \cdot \frac{\sinh[\gamma(x-L)]}{\sinh(\gamma L)} \quad (2.9)$$

mit

$L$  = Länge Feldsteuerelement

$$\gamma = \sqrt{Z' \cdot Y'} = \sqrt{\frac{G'_I + j\omega C'_I}{G'_{FSE} + j\omega C'_{FSE}}} \quad (2.10)$$

### 2.2.3.1. Grundlagen refraktiver Steuerungen

Typischerweise werden die Feldsteuerelemente für refraktive Steuerungen aus einem rußgefüllten Polymer, wie z.B. Silikon, EPDM o.ä. hergestellt. Einige Beispiele für Feldsteuermaterialien sind in **Tabelle 2.1** angegeben. Refraktive Steuerungen bieten sich besonders für Mittelspannungskabelgarnituren an, wo sie ein kompaktes Design und einfache Aufschiebeelemente ermöglichen.

Aufgrund des  $\tan \delta$  der verfügbaren Systeme eignen sie sich aber nicht für Hochspannungsanwendungen mit  $U_m > 52$  kV. Spezielle Metalloxide mit einem extrem hohen  $\epsilon_r$  wie z.B. Bariumtitanat ( $\text{BaTiO}_3$ ), Bleititanat ( $\text{PbTiO}_3$ ) oder Bleizirkonat ( $\text{PbZrO}_3$ ) haben sich nicht durchgesetzt, da relativ hohe Füllgrade notwendig sind,

Tabelle 2.1.: Typische elektrische Eigenschaften einiger refraktiver Feldsteuermaterialien

Eigenschaft	Aus [Sil13c]	Aus [Wan96]	Aus [Nel84]
$\epsilon_r$	15	35	25,5
$\tan\delta$	< 0,15	< 0,12	< 0,075

die die mechanischen Eigenschaften negativ beeinflussen [Nel84], [Sch08a]. Für rotierende elektrische Maschinen sind refraktive Steuerungen nicht geeignet, da technisch realisierbare relative Permittivitäten in einer dünnen Schicht einen zu geringen Einfluss haben und zudem keine Materialien verfügbar sind, die den hohen Temperaturen der thermischen Klasse F<sup>1</sup> standhalten [Rob95], [Riv98].

### 2.2.3.2. Grundlagen linear-resistiver Steuerungen

**Abbildung 2.3** zeigt nach [Riv98] exemplarisch für eine Spannung  $U = 15 \text{ kV}$  typische Potentialverläufe resistiver Steuerungen, die sich für unterschiedliche Leitfähigkeiten ergeben. Der Faktor  $\gamma$  aus Gleichung 2.10 wird durch eine reine Verwendung der Dicken von Isolation und FSE zu Gleichung 2.11 vereinfacht.

$$\gamma = \sqrt{\frac{\sigma_i + j\omega\epsilon_i\epsilon_0}{\sigma_{\text{FSE}} + j\omega\epsilon_{\text{FSE}}\epsilon_0} \frac{1}{d_I d_{\text{FSE}}}} \quad (2.11)$$

$d_I$  : Dicke Isolation

$d_{\text{FSE}}$  : Dicke FSE

Die strichlierten Verläufe zeigen eine unzureichende Steuerung, da das Potential nur unvollständig aufgebaut wird. Die durchgezogene, schwarze Kennlinie verfügt über eine zu geringe Leitfähigkeit, da der Gradient der Potentialverteilung zu hoch ist. Die beiden übrigen zeigen eine wirkungsvolle Steuerung, bei der das Potential vollständig aufgebaut wird. Zulässige maximale Feldstärken sind anwendungsabhängig (siehe Kapitel 8). Das "Überschwingen" der Potentialverteilung ist charakteristisch für ein resistives Feldsteuersystem und liegt in einer Phasenverschiebung zwischen dem Oberflächenpotential und der anliegenden Spannung begründet. Dies ist generell möglich, da die Zeitkonstante des Kettenleiters  $\tau_K$  klein gegenüber der Frequenz  $f$  der anliegenden Spannung ist [Riv99]. Die Phasenverschiebung ist am geerdeten (Schirm-)Ende am größten und nimmt zum hochspannungsseitigen Ende hin ab. Zu einer Erhöhung der tangentialen Feldstärke führt der abfallende

---

<sup>1</sup>Die thermische Klasse F entspricht einer Grenztemperatur  $T = 155 \text{ °C}$



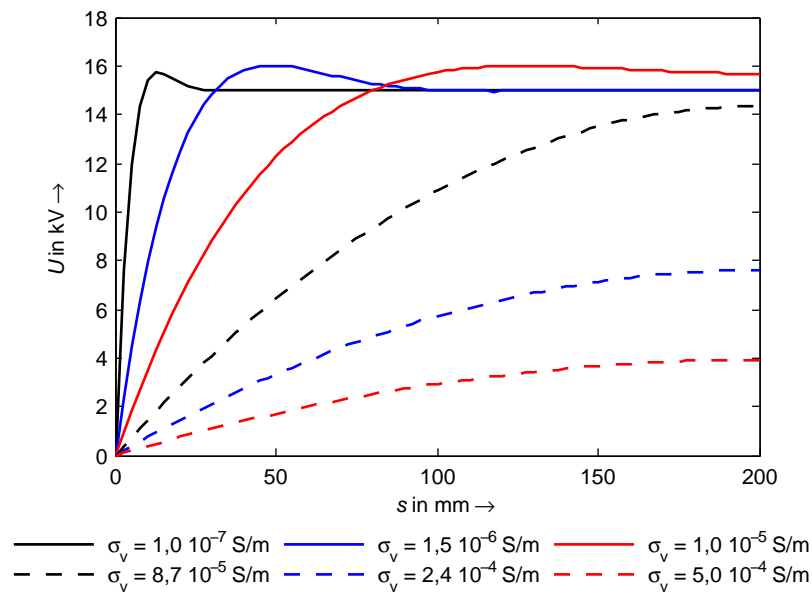


Abbildung 2.3.: Beispiel einiger Potentialverteilungen, die sich bei einer resistiven Steuerung ergeben würden (nach [Riv99])

Zweig dieser Überschwungung aber nicht, ebenso wenig ist ein Einfluss der Phasenverschiebung auf die Steuerwirkung des Systems zu erkennen. Gleichzeitig lassen sich so resistiv und kapazitiv steuernde Systeme unterscheiden [Gre00].

Resistive Feldsteuerelemente werden im Wesentlichen in Mittelspannungskabelgarnituren eingesetzt. Wirklich rein resistiv sind diese Systeme aber nicht, da der spezifische Widerstand abhängig von der Feldstärke ist und zudem die hohe relative Permittivität eine Rolle spielen kann [Str03].

Für Gleichspannungsanwendungen sind resistive Steuerungen allerdings die einzige Möglichkeit, zu hohe Feldstärken zu begrenzen. Da keine Verschiebungsströme fließen können, muss der resistive Steuerbelag zusätzlich durchgängig zwischen Erd- und Hochspannungselektrode angebracht sein, was sich aus der Eindringtiefe ableiten lässt, für die gilt  $\delta \rightarrow \infty$  bei  $\omega \rightarrow 0$  (siehe Gleichung 2.7). Zusätzlich müssen sie den Abfluss von Oberflächenladungen gewährleisten.

### 2.2.3.3. Besonderheiten nichtlinear-resistiver Steuerungen

Nichtlineare Steuerungen zeichnen sich durch einen stark von der elektrischen Feldstärke abhängigen spezifischen Widerstand  $\rho$  aus, für den in der Literatur unterschiedliche Modelle zur Beschreibung genutzt werden, so z.B. Gleichung 2.12 nach [Thi64]. Gebräuchlicher ist aber eine der Varistortechnik entlehnte Form (siehe Gleichung 2.13), die einen Nichtlinearitätsexponenten  $\alpha$  der elektrischen Feldstärke  $E$  definiert, auf dem basierend die vorangegangenen Betrachtungen erweitert werden

sollen. Bei praktischen Anwendungen nichtlinearer Feldsteuersysteme kann  $\alpha$  meist nur in Teilbereichen einer Kennlinie als konstant angenommen werden kann.

$$\rho = \rho_0^{-\gamma E} \quad (2.12)$$

$$\rho_0 = \rho(E \rightarrow 0)$$

$$J = k \cdot E^\alpha = \sigma_0 \left( \frac{E}{E_b} \right)^\alpha \quad (2.13)$$

$E_b$  : Durchbruchfeldstärke

$$\alpha = \frac{d(\ln(J))}{d(\ln(E))} \quad (2.14)$$

Auf Basis von Gleichung 2.13 leiten [Rhy97] und [Chr10] das nichtlineare Potential nach Gleichung 2.15 ab. Aus diesem lässt sich unter der Annahme einer konstanten Permittivität des FSE die in Gleichung 2.16 angegebene Eindringtiefe bestimmen.

$$\left( \frac{U}{E_b} \right)^{(\alpha-1)} = \frac{\omega \cdot C'_1}{A_{FSE} \cdot \sigma_{FSE}} \left( 1 - \frac{A_{FSE} \cdot \sigma_{FSE} \cdot \tau_{FSE}}{C'_1 \cdot \delta^2} \right) \delta^{1+\alpha} \quad (2.15)$$

$$\delta = \frac{U}{E_c} \left( \frac{A_{FSE} \cdot \sigma_{FSE} \cdot E_b^2}{C'_1 \cdot U^2} \right)^{1/(1+\alpha)} \quad (2.16)$$

Eine Trennung in frequenz- und spannungsabhängigen Teil liefert Gleichung 2.17:

$$\delta \propto \omega^{-1/1+\alpha} \cdot U^{\alpha/1+\alpha} \quad (2.17)$$

Es zeigt sich, dass nichtlinear-resistive Steuerungen ebenfalls frequenzabhängig sind, dieser Einfluss mit zunehmendem  $\alpha$  aber abnimmt. Gleichzeitig nimmt die Abhängigkeit von der Spannung zu, was durch eine Anpassung der Charakteristik eine Begrenzung der elektrischen Feldstärke bei verschiedenen Betriebs- und Prüfbelastungen ermöglicht. Eine nichtlineare Leitfähigkeit eines resistiven FSE wird daher unabhängig von der Anwendung für eine wirkungsvolle Steuerung als notwendig angesehen [Kel67a], [Kel67b], [Rob95] und [Chr10]. Diese Schlussfolgerung kann durch eine weitere Überlegung an Hand der Eindringtiefe bestätigt werden. Eine lineare Spannungsaufteilung, d.h.  $dU = \text{const.}$  kann entlang der Oberfläche aufgrund der kapazitiven Verkopplung mit der Isolation nur durch einen spannungsabhängigen Widerstand  $R(U)$  erreicht werden, der für das geforderte  $dU$  jeden beliebigen Wert annehmen kann. Für den Nichtlinearitätsexponenten nach Gleichung 2.14 gilt dann  $\alpha \rightarrow \infty$ , und die Eindringtiefe nach Gleichung 2.3 reduziert

sich aus dem allgemeinen Fall (Gleichung 2.16) [Rhy97] zu:

$$\delta = \frac{U}{E_b} \quad (2.18)$$

Die damit einhergehende scharfe Begrenzung der tangentialen elektrischen Feldstärke auf die in den Gleichungen 2.13 - 2.18 verwendete Durchbruchfeldstärke  $E_b$  wird, basierend auf idealisierten Simulationsrechnungen, oftmals in der Literatur gezeigt (u.a. in [Eig08]) und [Str01b]. Für eine Limitierung der elektrischen Feldstärke auf einen annähernd konstanten Wert im Bereich der Tripel-Zone sind schon geringe Werte für  $\alpha = 4-6$  ausreichend [Kel67a], und höhere Werte als  $\alpha = 10-20$  bewirken keine signifikante Verbesserung mehr [Chr10]. Das klassische Beispiel einer nichtlinear-resistiven Steuerung ist gegenwärtig der mit Siliziumcarbid (SiC) gefüllte Endenglimmschutz im Wickelkopf rotierender elektrischer Maschinen. Weitere Füllstoffe - neben dotiertem Zinkoxid (ZnO) - können Eisenoxid (FeO) und Zinnoxid (SnO) sein.



## 3. Übersicht aktueller feldsteuernder Systeme

### 3.1. Grundlegende Eigenschaften der verwendeten Polymere

Für die Wirkungsweise eines Feldsteuerelementes ist nicht nur der funktionale Füller verantwortlich, sondern auch die verwendete Matrix hat einen hohen Einfluss. Im Folgenden sollen die Basissysteme der untersuchten mikrovaristorgefüllten Polymere beschrieben werden. Sowohl Silikone als auch Phenolharzlacke werden seit Jahrzehnten erfolgreich in der Isolierstofftechnik eingesetzt.

#### 3.1.1. Silikonelastomere

Detaillierte Darstellungen zu diesem Abschnitt können [Tom90],[Dan94] und [Win03] entnommen werden. Silikonkautschuke - chemisch Polysiloxane - haben als Basissstruktur eine -Si-O-Si-Kette, an deren Zweigen frei drehbare Methylgruppen eingebaut sind. Die Polymere weisen dabei eine typische gekräuselte Form auf, wobei die einzelnen Einheiten in Abhängigkeit der Anzahl organischer Komponenten in mono-, di-, tri- und tetrafunktionell unterschieden werden. Die beiden zuletzt genannten sind die Basis räumlich vernetzter Elastomere. Die verfügbaren Silikonkautschuke werden in der Verarbeitung durch Vernetzungstemperatur und -prozess unterschieden [Tom90], [Win03]:

- RTV-1: Einkomponentig, bei Raumtemperatur kondensationsvernetzend
- RTV-2: Zweikomponentig, bei Raumtemperatur additionsvernetzend
- LSR: Liquid Silicone Rubber: Zweikomponentig, ab ca.  $T = 110^\circ\text{C}$  additionsvernetzend
- HTV: Einkomponentig, ab ca.  $T = 160^\circ\text{C}$  peroxidisch vernetzend; ein- und zweikomponentig, ab ca.  $T = 110^\circ\text{C}$  additionsvernetzend

Diese Basispolymere verfügen aufgrund von Formpress- und Extrusionsverfahren sowie Verguss über ein breites Einsatzspektrum für energietechnische Produkte.

RTV-1-Silikone werden in der elektrischen Energietechnik seltener eingesetzt. Bevorzugt werden vor allem HTV-Silikone, RTV-2-Silikone und zunehmend Flüssigsilikone, da diese aufgrund der hohen Vernetzungstemperaturen kurze Prozesszeiten erlauben. Flüssigsilikone haben den weiteren Vorteil, dass sie auf Spritzmaschinen mit niedrigeren Drücken verarbeitet werden können. Aufgrund ihrer im Vergleich dazu hohen Viskosität lassen sich aber HTV-Silikone sehr gut mit schwereren Füllstoffen, wie z.B. Keramiken füllen, und erlauben zusätzlich eine gute Verteilung der Partikel in der Silikonmatrix. So lässt sich der spezifische Durchgangswiderstand durch die Befüllung mit Carbon Blacks o.ä. in Abhängigkeit des Füllgrades über einen weiten Bereich einstellen. Gleichmaßen werden auf diese Weise hochpermittive Materialien erzeugt. In der sich von klassischen, kohlenstoffbasierten Isolierstoffen unterscheidenden Grundstruktur liegen die guten mechanischen Eigenschaften und die hohe Beständigkeit gegenüber Ozon (Sauerstoff), UV-Licht und Wärme begründet. Zudem verlieren sie ihre mechanische Flexibilität auch bei tiefen Temperaturen nicht. Sie erfüllen damit alle Ansprüche an einen Isolierstoff für einen Freilufteinsatz. Ihre hohe Freiluftbeständigkeit gegenüber auftretenden Verschmutzungen erreichen sie besonders durch ihre Hydrophobie, die sich nicht nur nach einem Verlust wieder regeneriert, sondern auch auf anhaftende Fremdschichten übertragen kann. Die mechanische Festigkeit kann durch eine Befüllung mit Siliziumoxid (pyrogene Kieselsäure) verstärkt werden. Die Kriechstrom- und Lichtbogenbeständigkeit wird in der Regel durch Aluminiumtrihydrat (ATH) verbessert. Typische Eigenschaften von in der elektrischen Isoliertechnik eingesetzten Silikonelastomere (engl. Silicone rubber) (SIR) sind in **Tabelle 3.1** zusammengefasst.

Tabelle 3.1.: Eigenschaften von Silikonelastomeren nach [Tom90],[Dan94],[Win03]

Eigenschaft	Typische Werte
Durchschlagfestigkeit:	15–30 kV/mm
Oberflächenwiderstand:	$10 \cdot 10^{12} - 10 \cdot 10^{14} \Omega$
Spez. Durchgangswiderstand:	$10 \cdot 10^{15} - 10 \cdot 10^{16} \Omega \text{ cm}$
Kriechstromfestigkeit:	2,5–4,5 kV
Lichtbogenfestigkeit:	150–420 s
Gasdurchlässigkeit:	$60 \cdot 10^6 \frac{\text{cm}^3 \text{ cm}}{\text{s}}$

Typische Einsatzgebiete für Silikonelastomere sind in der Energietechnik [Win03]:

- Aufschiebbare Kabelgarnituren: Muffen und Endverschlüsse
- Verbundlangstab- und Hohlisolatoren

- Direkt vergossene Überspannungsableiter

### 3.1.2. Phenolharze

Phenolharze - Polyformaldehyd (PF) - sind synthetische Isolierstoffe. Ihre Herstellung erfolgt durch die Kondensation von Phenol mit Formaldehyd [Dom08]. Abhängig vom Molverhältnis werden sie in alkalisch-gelöste Resole und sauer-gelöste Novolake unterschieden. Resole durchlaufen während der Vernetzung drei Zustände. Der A-Zustand entspricht dem Harz, wie es aus den Reaktoren fließt. Beim Übergang in den B-Zustand wird das Harz gummiartig und fast unlöslich. Im C-Zustand erfolgt die vollständige Aushärtung. Eine Novolake ist dagegen nur durch einen Härter vernetzbar und durchläuft entsprechend den B- und C-Zustand. Eine Aushärtung erfolgt überwiegend durch erhöhte Temperaturen, die auch unterbrochen werden kann. Aber auch eine kalte Aushärtung ist möglich [Bri75], [Dom08]. Ihre Anwendungen finden sie vor allem als Bindemittel für Holzwerkstoffe [Dom08]. Als Isoliermaterialien wurden Platten, gewickelte Röhren und Durchführungen aus getränkten Papieren hergestellt. Diese Hartpapiere waren die ersten verfügbaren ölfreien Isolierteile [Küc09]. Für die untersuchten Endenglimmschutzsysteme wird ein Resol verwendet. Das verwendete System hat den Vorteil, dass es durch Verdunstung des Lösungsmittels austrocknet. Generell hat ein reaktives System den Vorteil, dass es stabiler gegen äußere Einflüsse wird. Im Bereich des Endenglimmschutzes zeichnen sich aber keine Neuentwicklungen z.B auf Basis eines Epoxidharzes ab. Generell werden mehr und mehr Bänder eingesetzt, da diese einfacher zu applizieren sind. Die untersuchten Lacke können sowohl im Resin Rich als auch im Vacuum Pressure Impregnation (VPI)-Verfahren<sup>2</sup> eingesetzt werden und verfügen über die thermische Klasse F.

## 3.2. Füllstoffe für polymere Feldsteuermaterialien

Zunächst soll eine Begriffsdefinition die Unterschiede zwischen ZnO-Mikrovaristoren und anderen halbleitenden Füllstoffen aufzeigen, um die unterschiedliche Wirkungsweise zu verdeutlichen. Als *Mikrovaristoren* sollen nur funktionale Füller bezeichnet werden, die aufgrund ihrer intrinsischen Eigenschaften eine nichtlineare *E-J*-Charakteristik im gefüllten Polymer erreichen und sich damit z.B. klar von SiC und Carbon Black unterscheiden, die auf Grund eines Grenzflächeneffektes, dem sogenannten Tunneleffekt zwischen den einzelnen Partikeln, eine nichtlineare *E-J*-Charakteristik des gefüllten Polymers erreichen.

---

<sup>2</sup>Beim Resin Rich Verfahren werden die einzelnen Wicklungstäbe unter hohem Druck und hoher Temperatur mit dem Isolierharz imprägniert. Beim VPI-Verfahren werden sie unter Vakuum bei hoher Temperatur im Harz getränkt[Sto13]

#### 3.2.1. Carbon Black

Der englische Begriff *Carbon Black* verdeutlicht, dass es sich bei den leitfähigen Rußen nicht um ein Abfallprodukt handelt, sondern um einen gezielt produzierten funktionalen Füller, der die Herstellung sowohl leitfähiger als auch hochpermittiver Polymere ermöglicht. Unter anderen ist der am häufigsten angewandte Herstellungsprozess der sogenannte *Furnace Prozess*, bei dem Öl mit einem Trägergas und Luft unvollständig verbrannt wird. Charakterisiert werden Carbon Blacks durch [Sch08b]:

- Primärteilchengröße  $d = 10-100 \text{ nm}$
- Spezifische Oberfläche  $A = 80-1500 \text{ m}^2/\text{g}$
- Struktur
- Oberflächenchemie

Unterschiedliche Strukturen der Carbon Blacks werden definiert, um die möglichen Agglomerationen, die sogenannten Aggregate beschreiben zu können. Die Oberflächenchemie ist wichtig für die Einbettung in das Polymer, z.B. Silikon, Polyethylen, Polypropylen oder Polyvinylchlorid, und hat neben dem Füllgrad einen entscheidenden Einfluss auf die Leitfähigkeit des gefüllten Polymers [Sch08b]. Die starke Abhängigkeit der elektrischen Eigenschaften vom Füllgrad wird in Perkulationskurven beschrieben. Als Perkolation wird die Kettenbildung der einzelnen Teilchen in der Polymermatrix bezeichnet. Ein Beispiel für die Abhängigkeit des Widerstandes vom Füllgrad ist in **Abbildung 3.1** gezeigt.

Als weitere elektromechanische Einflussfaktoren auf  $\sigma$  des gefüllten Polymers sind zu nennen [Ste03] [Sch08b]:

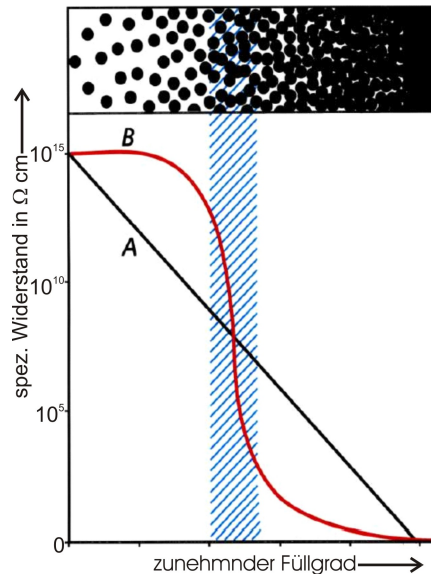
- Nichtlineare Zunahme mit dem anliegenden elektrischen Feld
- NTC-Verhalten
- Scherbeanspruchungen während der Verarbeitung des Gemisches
- Reduktion durch Dehnungsbeanspruchungen
- Druckabhängigkeit gegenüber einer Elektrode

Der Füllgrad von leitfähig (niederohmig) eingestellten Polymeren liegt deutlich über der Perkolationsschwelle, was die elektrischen Eigenschaften stabil gegenüber äußeren Einflüssen macht. Ein typischer Wert für den spezifischen Widerstand ist<sup>3</sup>:  $\rho_{\text{spez.}} = 30 \text{ } \Omega \text{ cm}$ . Leitfähige, mit Carbon Blacks gefüllte Polymere haben generell einen weiten Einsatzbereich. Sie vermeiden elektrostatische Aufladungen an Geräten

---

<sup>3</sup>Wacker Chemie AG, Datenblatt POWERSIL 440, Veröffentlichung: 05.05.2008





Abbildungung 3.1.: Darstellung der elektrischen Leitfähigkeit in Abhängigkeit des Füllgrades als typische Perkolkationskurve eines rußgefüllten Polymers (nach [Sch08b])

und Einrichtungen, werden als Kontakte in der Elektronik und als Messelektroden in der Medizintechnik eingesetzt [Ste03]. In der elektrischen Energietechnik werden sie vor allem als innere und äußere Leitschicht in Energiekabeln eingesetzt. Zudem werden Deflektoren für geometrische Steuerungen mit ihnen realisiert (siehe Kapitel 2.2.1).

Für die Steuerung mit einem Impedanzbelag (siehe Abschnitt 2.2.3) werden sowohl hochpermittiv (refraktive Steuerung) als auch hochohmig (resistive Steuerung) eingestellte Materialien eingesetzt. Beide haben den entscheidenden Nachteil, dass sie mit einem Füllgrad<sup>4</sup> nahe der Perkolationsschwelle gefüllt werden müssen, um die notwendige relative Permittivität  $\epsilon_r$  bzw. den spezifischen Widerstand  $\rho_{\text{spez.}}$  zu erreichen, was sie im Unterschied zu den leitffähig eingestellten Polymeren sehr instabil gegenüber mechanischen Beeinflussungen macht. Die relative Permittivität ist, je nachdem welcher Füllgrad und Rußtyp verwendet wird, stark von der elektrischen Feldstärke abhängig, was nicht zwangsläufig effektivere refraktive Steuerungen ermöglicht. Mit zunehmender Temperatur sinken zudem der Verlustfaktor und die relative Permittivität [Nel84], [Ste03] und [Win03].

Gleichmaßen nahe der Perkolationsschwelle müssen Polymere für ein resistiv steuerndes System eingestellt werden. Die notwendigen spezifischen Widerstände liegen im Bereich  $\rho_{\text{spez.}} = 10^8 - 10^{10} \Omega \text{ cm}$  [Bla79]. Der Widerstand des Materials ist ebenso anhängig von der Feldstärke, der mechanischen Dehnung, der Verarbeitung und dem verwendeten Polymer selbst. Dementsprechend müssen immer die resisti-

<sup>4</sup>Ein exemplarischer Wert für ein permittives System ist nach [Nel84]: < 10 gew. %

ven und refraktiven Eigenschaften der rußgefüllten Polymere - z.B. Polyethylene, Silikone - bei der Auslegung als Feldsteuerelement berücksichtigt werden. Gerade die Abhängigkeit von einer mechanischen Dehnung ist nachteilig für Kabelgarnituren, bei denen ein Typ auf mehrere Leiterdurchmesser anwendbar sein muss [Bla79], [Lup94], [Str03], [Str01a], [Ste03], [Wei08c].

### 3.2.2. Siliziumcarbid

Der nichtlineare Oberflächenwiderstand einer SiC-gefüllten Lackschicht wird nach Gleichung 2.12 mit den typischen Werten:  $\rho_0 = 10\text{--}100\text{ G}\Omega$  und  $\gamma = 1,5\text{--}2\text{ cm/kV}$  beschrieben [Bau11]. Die Parameter sind von den Dotierstoffen Bor oder Stickstoff sowie der Partikelgröße abhängig [Bau11]. Die nichtlineare  $U$ - $I$ -Charakteristik bildet sich aufgrund des Tunneleffektes an der Sekundärkorngrenze der Partikel zueinander aus, siehe **Abbildung 3.2**. Mit abnehmender Partikelgröße nehmen die Leitfähigkeit und der Grad der Nichtlinearität ab. Den gleichen Effekt hat ein abnehmender Füllgrad des SiC in einem Polymer. SiC-gefüllte Phenolharze werden z.B. als Endenglimmschutz rotierender elektrischer Maschinen eingesetzt. Die wichtigsten Eigenschaften sind in **Tabelle 3.2** zusammengefasst.

Tabelle 3.2.: Übersicht über die wichtigsten Eigenschaften des Füllstoffes Siliziumcarbid (SiC) (Quelle: [Kel67b])

Eigenschaft	Wert
Dichte	$3,2\text{ g/cm}^3$
Thermischer Ausdehnungskoeffizient $\gamma_{\theta=0^\circ\text{C}}$	$7 \cdot 10^{-6}/\text{K}$
Thermischer Ausdehnungskoeffizient $\gamma_{\theta=200^\circ\text{C}}$	$6 \cdot 10^{-6}/\text{K}$
spezifische Wärme $c_{\theta=20^\circ\text{C}}$	$680 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$
Bandabstand $E_g$	$3,1\text{ eV}$
Volumenwiderstand $\rho_{\theta=20^\circ\text{C}}$	$10^{-3}\text{--}1\text{ }\Omega\text{ m}$
Temperaturkoeffizient des Widerstandes	$-0,007\text{ K}^{-1}$
Relative Permittivität $\epsilon_r$ statisch	10,2

Ein generelles Problem stellt die starke Streuung der elektrischen Eigenschaften dar, die trotz des lange bekannten Einsatzes des Materials noch nicht gelöst ist [Kel67a], [Bra08]. Diese ist zum einen im beschriebenen Leitfähigkeitsmechanismus und zum anderen in seiner Verfügbarkeit begründet, da es sich um ein Beiprodukt der Schleifmittelindustrie handelt. Die Charakterisierung von SiC-gefüllten Systemen ist bei Gleichspannung möglich, da die Gleichspannungskennlinie mit der Wechsellspannungskennlinie identisch ist (siehe Abschnitt 6.5).

### 3.2.3. Mikrovaristoren

Mikrovaristoren aus einer dotierten Zinkoxid-(ZnO-)Keramik wurden erstmals im Jahr 2000 als Füllstoff von Feldsteuerelementen in Kabelgarnituren vorgestellt [Hav00b], [Str00]. Bei gleichen elektrischen Eigenschaften wie die in der Energie-



Abbildung 3.2.: Möglicher Strompfad durch eine Kette von SiC Partikeln, frei nach [Don11]

technik und Elektronik eingesetzten Varistoren haben diese nur einen Durchmesser von  $D_{50} = 10\text{--}200\text{ }\mu\text{m}$  [Gre04], [Don07]. **Abbildung 3.3**<sup>5</sup> zeigt als Beispiel die REM-Aufnahme einer Pulverprobe. Im Folgenden werden Herstellung und Eigenschaften von Mikrovaristoren sowie von damit gefüllten Polymeren erläutert. Eine erste kommerzielle Anwendung wird in Abschnitt 4.3 vorgestellt.



Abbildung 3.3.: REM Aufnahme einer Probe von Mikrovaristorpartikeln

#### 3.2.3.1. Herstellung

Das Zinkoxid ( $\text{ZnO}$ ) wird mit den Dotierstoffen ( $m' \leq 10\text{ Gew.}\%$ ), wie z.B.  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  und  $\text{Sb}_2\text{O}_3$ , in einem wässrigen Schlicker gemischt. Eine Übersicht über die Einflussmöglichkeiten der verschiedenen Dotierstoffe kann [Was94] entnommen werden. Der anschließende Sprühtrocknungsprozess bewirkt die typischen Einstülpungen der Partikel. Die Sinterung des Pulvers erfolgt in einem klassischen Sinter- oder in einem Drehrohrföfen bei einer Temperatur  $T = 1000\text{--}1100\text{ }^\circ\text{C}$ . Gelegentlich wird

---

<sup>5</sup>Mit freundlicher Unterstützung durch Hrn. Rashid Baraki des Fachgebiets Nichtmetallisch-Anorganische Werkstoffe der TU Darmstadt entstanden

dieser Prozess auch Kalzinierungsprozess genannt. Um eine bessere Kontaktierung sowie ein höheres Energieaufnahmevermögen zu erhalten, können noch metallische Partikel beigegeben werden, die sich an der Oberfläche anlagern. Entstandene Agglomerate werden anschließend mechanisch getrennt und gegebenenfalls in diverse Siebprofile eingeteilt. Die Prozessparameter und die Rezeptur selbst erlauben nun die Variation der nichtlinearen  $U$ - $I$ -Kennlinie der Mikrovaristoren über einen weiten Bereich [Boe01a], [Gra03a], [Gre04] und [Don11].

### 3.2.3.2. Physikalische Eigenschaften

Mikrovaristoren verfügen wie Energievaristoren über eine nichtlineare  $U$ - $I$ -Kennlinie und eine hohe relative Permittivität  $\epsilon_{r \text{ ZnO}} \geq 500$  [Bhu81] bzw.  $\epsilon_{r \text{ ZnO}} \approx 800-1200$  [Gre89]. Ein charakteristischer Kennwert der Kennlinie ( $J_{\text{DC}} \propto E^\alpha$ ) ist die Schaltspannung  $U_{b\text{-DC}}$  ( $J_{\text{DC}} = 1 \text{ mA/cm}^2$ )<sup>6</sup> [Gre04], bei der die Mikrovaristoren stark leitfähig werden und einen hohen Nichtlinearitätsexponenten  $\alpha = \frac{d \ln(J)}{d \ln(E)} \approx 40$  aufweisen. An einer einzelnen Korngrenze beträgt die Schaltspannung  $U_b \approx 3,2 \text{ V}$ . Abhängig von der Größe der Mikrovaristoren  $D_{50} \approx 100-160 \mu\text{m}$  beträgt die Schaltspannung eines einzelnen Zinkoxid-Partikels  $U_b \approx 9-24 \text{ V}$ . Der Schalterpunkt der Mikrovaristoren kann über eine Beeinflussung des Kornwachstums durch die Prozessparameter Rezeptur und Sintertemperatur eingestellt werden. Mögliche Bereiche sind  $E_b = 300-7000 \text{ V/mm}$ . Große Körner innerhalb der Partikel bewirken eher niedrige Schalterpunkte und kleinere entsprechend höhere. Dagegen hat die Größe der Partikel selbst nur einen geringen und die Form der Partikel sogar keinen Einfluss auf die Kennlinie [Don11]. **Abbildung 3.4**<sup>7</sup> zeigt das Beispiel einer Siebfraktion mit  $D < 130 \mu\text{m}$  eines Mikrovaristorpulvers. Es ist gut zu erkennen, dass das Pulver neben den ganzen Partikeln auch aus Bruchstücken besteht. Die Charakterisierung des Pulvers erfolgt bei Gleichspannung und wird in Abschnitt 3.2.3.4 beschrieben. Zu beachten ist die sehr gute Reproduzierbarkeit der Kennlinie und die hohe Strombelastbarkeit  $J_{\text{max}} \approx 10-100 \text{ A/cm}^2$  eines einzelnen Mikrovaristorpartikels [Boe01a], [Gre04], [Don11] und [Don12].

### 3.2.3.3. Leitungsmechanismus

Die stark nichtlineare  $U$ - $I$ -Kennlinie der Mikrovaristoren als intrinsische Eigenschaft ist in der Kristallstruktur der Zinkoxid-Keramik begründet und dem Verhalten von Energievaristoren äquivalent, deren Physik plausibel in der Literatur verstanden ist. Einen Überblick bieten [Was94], [Cla99] und [Gre10]. Die einzelnen Körner sind

<sup>6</sup>Aufgrund deren geringerer Leitfähigkeit kann diese Definition nicht für mikrovaristorgefüllte Polymere verwendet werden (siehe Gleichung 3.1)

<sup>7</sup>Mit freundlicher Unterstützung von Hrn. Dipl.-Ing. Michael Schlosser vom Institut EMK der TU Darmstadt



Abbildung 3.4.: Mikroskopaufnahme mit 200-facher Vergrößerung eines Mikrovaristorpulvers mit  $D < 130 \mu\text{m}$

durch Korngrenzen sowie Spinellphasen in den Tripel-Zonen voneinander separiert. Während die n-dotierten Körner selbst sehr gut leiten, sind in den Korngrenzen  $d \approx 1 \text{ nm}$  breite Potentialbarrieren ausgebildet, die beiderseits eine mit  $d \approx 100 \text{ nm}$  breite isolierende Schicht, die sogenannte Verarmungsschicht bewirken. Das ausgeprägte Verhalten wird als Doppelschottkydiode beschrieben. Diese Grenzschichten sind mit Ionen (z.B.  $\text{Bi}^{3+}$ ,  $\text{Pr}^{3+}$  oder  $\text{Ba}^{2+}$ ) dekoriert [Was94]. Für die Erzeugung der hohen Potentialbarrieren sind zudem tiefliegende Bulkdonatoren (z.B.  $\text{Co}^{3+}$  und  $\text{Mn}^{3+/4+}$ ) und flache Donatoren (z.B.  $\text{Al}^{3+}$  und  $\text{Ga}^{3+}$ ) notwendig. Die negative Ladung in dieser Korngrenze entsteht durch eindiffundierende Elektronen und Sauerstoffionen, die eine leichte Überkompensation bewirken. Im angrenzenden ZnO-Korn bleibt durch diesen Abfluss eine Verarmungszone zurück. Im in [Gre89] und [Gre90] vorgestellten Modell (siehe **Abbildung 3.5**) nehmen die Elektroden durch ein anliegendes elektrisches Feld genug Energie im Bereich der Korngrenze auf, so dass sie durch Stoßionisation neue Elektronen-Löcher-Paare erzeugen können. Die Löcher driften zur Korngrenze zurück und können dort einen Teil der negativen Ladung kompensieren, so dass die Potentialbarriere reduziert wird. Entsprechend können weitere Elektronen die Korngrenze passieren, was schließlich zu einer Löcherlawine führt. Dem entgegen wirkt eine Re-Emission sowie Rekombination der Löcher mit den Elektronen [Was94]. Reicht die Produktion der Löcher bei einer steigenden Spannung aus, nimmt die Ladung der Korngrenze ab und der Strom rasch zu, so dass weitere „heiße“ Elektronen in die Korngrenze gelangen und die Potentialbarriere zusammenbricht. In diesem Bereich treten die hohen Nichtlinearitätsexponenten  $\alpha \leq 200$  auf. Beachtenswert ist allerdings, dass sich in einem Energievaristor der Strom zunächst nur in einzelnen Filamenten ausprägt und sich erst im Bereich hoher Stromdichten homogener im Varistor verteilt [Gre10].

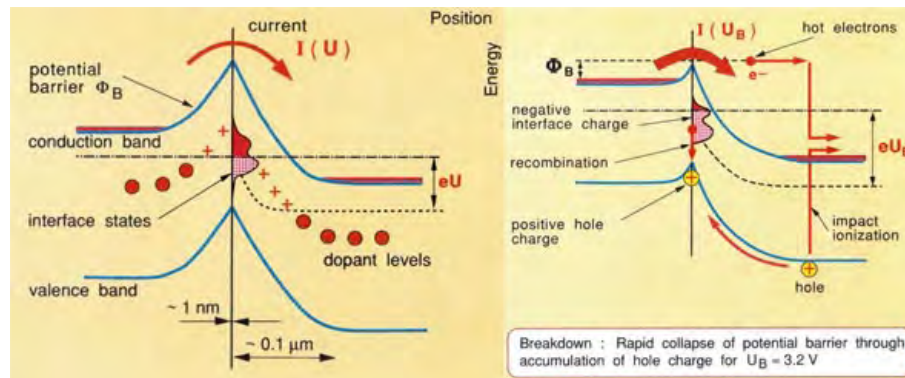


Abbildung 3.5.: Durchbruchmechanismus in einem ZnO-Varistor; Links: Vordurchbruchbereich; Rechts: Zusammenbruch der Potentialbarriere (Quelle: [Gre89]).

#### 3.2.3.4. Eigenschaften eines mikrovaristorgefüllten Silikons

Die Eigenschaften der Mikrovaristoren lassen sich teilweise auf ein gefülltes Polymer übertragen, wie beispielhaft in **Abbildung 3.6** der Vergleich der DC-Kennlinien einer mikrovaristorgefüllten Ölprobe und einzelner Mikrovaristorpartikel zeigt. Es fällt aber auf, dass bei diesen einfachen, aber hochgefüllten Kompositen im Vergleich zum einzelnen Partikel wesentlich geringere maximale Stromdichten erreichbar sind. Die Ursache ist, dass der Strom durch die Probe nur filamentös fließt, was bei Energievaristoren ein bekannter Effekt ist und durch die Verteilung der Mikrovaristoren in der Polymermatrix verstärkt wird. Dies scheint gleichfalls die Ursache für den beschriebenen geringen Einfluss der Partikelgröße und -form zu sein. So spielt vor allem hier der Kontaktwiderstand der einzelnen Partikel eine Rolle, der sich aber durch eine Anreicherung von nanoskaligen Metallpartikeln auf deren Oberfläche verringern lässt [Gre04], [Gre10]. Das entsprechende Modell eines möglichen Strompfades durch ein mikrovaristorgefülltes Polymer ist in **Abbildung 3.7** dargestellt. In diesem Komposit werden die Korngrenzen des einzelnen Mikrovaristors als primäre Korngrenzen bezeichnet. Durch sie wird, wie beschrieben die nichtlineare  $E$ - $J$ -Kennlinie auf das Polymer übertragen und im Wesentlichen bestimmt. Dagegen nennt man die Kontaktbereiche der Mikrovaristorpartikel sekundäre Korngrenzen. Weitergehende Erfahrungen bestehen mit Polymeren auf Silikon-, Epoxy-, Ethylenvinylacetat- und Butyl-Basis, deren jeweilige chemische Struktur ebenfalls einen Einfluss auf die resultierende Kennlinie haben. Allgemein müssen die Polymere überperkolativ gefüllt werden (Füllgrad  $>25$  Vol.%), um eine ausreichende nichtlineare Leitfähigkeit zu erhalten [Pea08], [Gra03c] und [Don11]. Charakterisiert werden die gefüllten Polymere ebenfalls durch einen bei Gleichspannung gemessenen Schaltpunkt  $E_b$ , für den es aber, wie auch in [Mül12] dokumentiert, keine einheitliche Bezeichnung respektive Definition in der Literatur gibt. In der vorliegen-



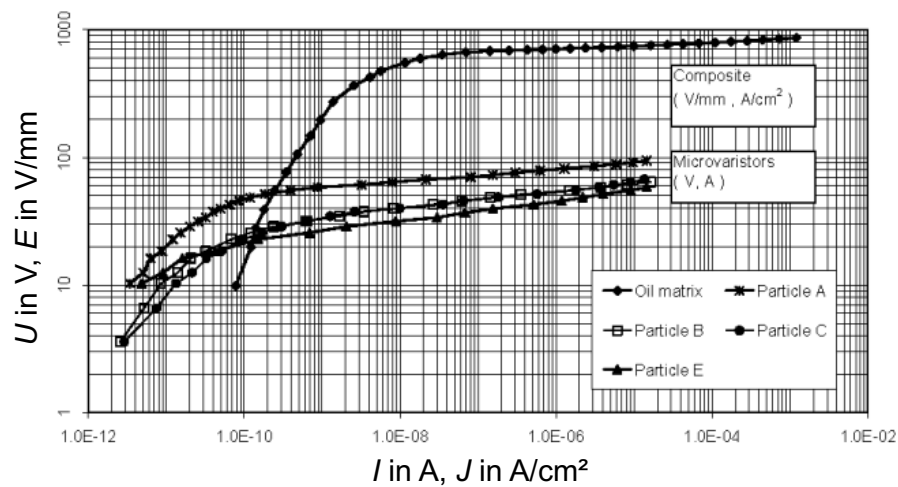


Abbildung 3.6.: Vergleich von DC-Kennlinien, die an einzelnen Mikrovaristoren sowie einer mit Mikrovaristoren gefüllten Ölprobe aufgenommen wurden. Zu beachten ist, dass Stöme mit Stromdichten verglichen wurden (Quelle: [Gre04])

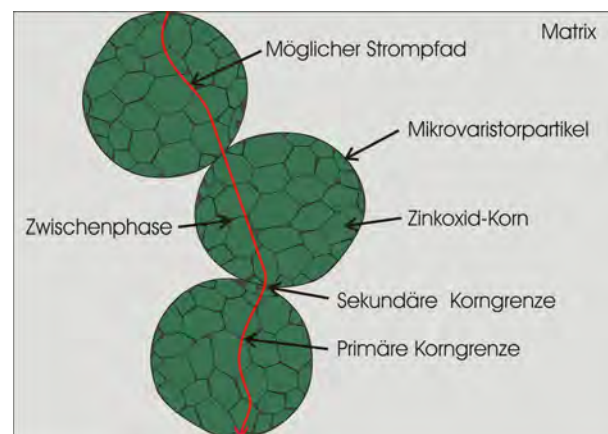


Abbildung 3.7.: Möglicher Strompfad durch ein mit Mikrovaristoren gefülltes Polymer, frei nach: [Don11]



den Arbeit werden die Begriffe Durchbruchfeldstärke und Schaltpunkt verwendet, die bei Gleichspannung und einer festen Stromstärke aufgenommen werden:

$$E_{b-DC} \text{ gemessen bei } J_{DC} = 1 \frac{\mu A}{cm^2} \quad (3.1)$$

Diese Definition wird in Kapitel 6 für die gefüllten Polymere spezifiziert und um die Wechsellspannungscharakteristik ergänzt, die in der Literatur selten dargestellt ist und wenn, dann nur als  $\hat{u}(\hat{i})$ -Kennlinie angegeben wird [Don11]. Wie bei der Verwendung von Bariumtitanat ist auch bei einer Befüllung mit ZnO der hohe Füllgrad  $m' > 38 \text{ Vol.}\%$  (75 Gew.%) ausschlaggebend, um eine hohe relative Permittivität zu erhalten. Diese wird in [Gra03c] exemplarisch mit  $\epsilon_r = 15$  bei einem  $\tan \delta < 0,6$  angegeben. Die Abhängigkeit eines resultierenden  $\epsilon_r$  von den einzelnen Anteilen des Gemisches lässt sich mit Hilfe der Lichteneckerschen Mischungsregel abschätzen [Küc09]:

$$\ln(\epsilon_{r-res}) = v_1 \cdot \ln(\epsilon_{r-1}) + \dots + v_n \cdot \ln(\epsilon_{r-n}) \quad (3.2)$$

$v_1, v_n$  : Volumenanteile

**Abbildung 3.8** zeigt exemplarisch die resultierenden relativen Permittivitäten für drei angenommene  $\epsilon_r$  der Mikrovaristoren, die in eine Silikonmatrix ( $\epsilon_r = 2,3$ ) eingebettet sind. Typische überperkolative Füllgrade mikrovaristorgefüllter Polymere liegen im Bereich 30–35 Vol.%(ca. 70–75 Gew.%). Es zeigt sich dabei, dass die resultierende Permittivität im Wesentlichen durch das Polymer bestimmt wird. Die gute Übereinstimmung der resultierenden relativen Permittivität zu dem Wert  $\epsilon_{r-res} = 15$  nach [Gra03b] zeigt, dass eine Kapazität an den Sekundärkorngrenzen keinen Einfluss auf den kapazitiven Stromanteil der Kennlinie hat. Aufgrund des hohen Füllgrades ist die nichtlineare Leitfähigkeit sehr stabil. Auf eine Abhängigkeit von der anliegenden Feldstärke und Frequenz wird in der Literatur nicht eingegangen. Die Eigenschaften sind aber auch von der Wahl des Polymers abhängig.

Beim mikrovaristorgefüllten Polymer muss die Kennlinie nach Wechsel- und Gleichspannungskennlinie unterschieden werden. Aufgrund der Ladungseffekte in den Korngrenzen ist die Leitfähigkeit nach dem Schalten des Materials bei Gleichspannung höher als bei Wechsellspannung. Entsprechend setzt sich die Kennlinie eines gefüllten Polymers bei Wechsellspannung aus einem kapazitiven und einem resistiven Strom zusammen, aufgrund dessen die Gesamtleitfähigkeit im Vordurchbruchbereich höher ist gegenüber der Gleichspannungscharakteristik [Don11]. So kann ein zu **Abbildung 3.9a)** äquivalentes Ersatzschaltbild angenommen werden, bei dem sich aber das Verhältnis  $\hat{i}_{kap}/\hat{i}_{res}$  im Vergleich zu einem konventionellen

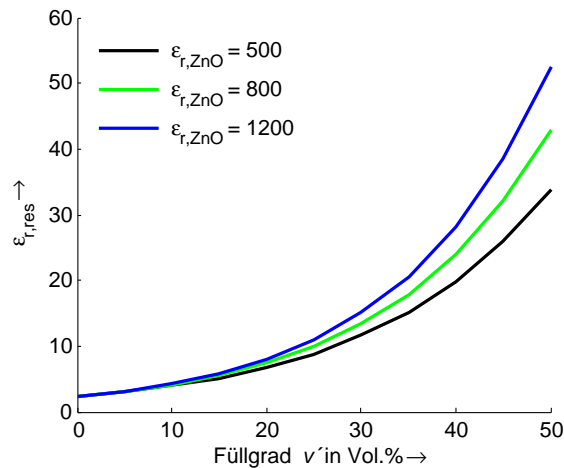


Abbildung 3.8.: Resultierende relative Permittivitäten eines mikrovaristorgefüllten Silikons in Abhängigkeit des Füllgrades nach Gleichung 3.2.

Energievaristor unterscheiden wird. Ursache ist die schon beschriebene Einbettung der Mikrovaristoren in die Polymermatrix und die damit ebenfalls verbundene geringere Stromtragfähigkeit (siehe [Gre04]). Das Ersatzschaltbild stellt eine Vereinfachung des unter **Abbildung 3.9b)** gezeigten Modells dar, bei dem der Vordurchbruchbereich durch einen hochohmigen Widerstand  $R_S$  und der Durchbruchbereich durch einen niederohmigen Widerstands  $R_P$  repräsentiert wird.

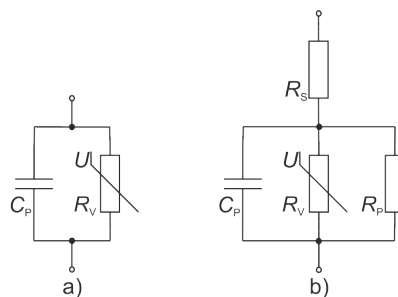


Abbildung 3.9.: Ersatzschaltbild eines Varistors, nach [Was94]

Aktuell ist ein Typ mikrovaristorgefülltes Silikon als Versuchsmuster kommerziell erhältlich. Dessen wichtigste Eigenschaften sind in **Tabelle 3.3** angegeben. Auffällig sind die mechanischen Eigenschaften wie die geringe Reißfestigkeit und die hohe Härte<sup>8</sup>. Die Angabe des Verlustfaktors täuscht aber darüber hinweg, dass es sich um ein funktionales Material handelt, das nicht als klassischer Isolierstoff betrachtet werden kann.

Einen aktuellen Überblick über die Eigenschaften mikrovaristorgefüllter Polymere liefert [Don11]. So zeigt sich eine thermische Abhängigkeit der Leitfähigkeit  $\sigma$ . Sie

<sup>8</sup>Typisch für ein normales Silikon sind: Reißfestigkeit:  $6,5 \text{ N mm}^{-2}$ , Härte 30 Shore A

Tabelle 3.3.: Eigenschaften eines kommerziell erhältlichen Versuchsmusters des mikrovaristorgefüllten Silikons mit einem Schalterpunkt  $E_b = 1000\text{--}1200\text{ V/mm}$  [Sil13e]

Eigenschaft	Wert
Dichte	$2,84 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
Härte	67 Shore A
Reißfestigkeit	$2,5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
Reißdehnung	150 %
Weiterreißwiderstand	$16 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$
relative Permittivität $\epsilon_r$	12
dielektrischer Verlustfaktor $\tan\delta$	0,13
Füllgrad	78,5 Gew. %

nimmt bei einer Temperatur  $T = 70\text{ °C}$  unterhalb des Schalterpunktes aufgrund eines thermisch aktivierten Stromes in den Mikrovaristoren leicht zu. Bei höheren Temperaturen, hier  $T = 90\text{ °C}$ , nimmt die Leitfähigkeit mit zunehmender Ausdehnung des Silikons wieder ab. Im Bereich der Kennlinie oberhalb des Schalterpunktes dominiert dieser Effekt. Die thermische Abhängigkeit der Leitfähigkeit ändert sich also von einem PTC<sup>9</sup>- zu einem NTC<sup>10</sup>-Verhalten.

Materialprüfungen durch die Projektpartner haben zusätzlich gezeigt, dass eine auf die jeweilige Matrix angepasste Behandlung der Mikrovaristoren vor der Füllung notwendig ist. Diese betreffen vor allem die Haftung der Mikrovaristoren in der Matrix sowie den Verbund des gefüllten Compounds mit weiteren Materialien.

<sup>9</sup>Positiver Temperaturkoeffizient (engl.: Positive Temperature Coefficient) (PTC)

<sup>10</sup>Negativer Temperaturkoeffizient (engl.: Negative Temperature Coefficient) (NTC)



## **4. Ausgewählte Anwendungsbeispiele für mikrovaristorgefüllte Polymere**

Prinzipbedingt sind feldsteuernde Maßnahmen praktisch in jedem Gerät und Isoliersystem der elektrischen Energieversorgung zu finden. Im Folgenden sollen die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten möglichen Anwendungen von mikrovaristorgefüllten Polymeren und deren spezielle Problematik beschrieben werden. Während der Endenglimmschutz rotierender elektrischer Maschinen und die Feldsteuerelemente in Kabelgarnituren im Wesentlichen Entladungen in der Tripel-Zone einer Gleitanordnung vermeiden müssen, ist bei einer Feldsteuerung an Langstabisolatoren die Verbesserung der Isolierfähigkeit unter Beregnung und Verschmutzung das Ziel.

### **4.1. Verbundlangstabisolatoren**

Verbundlangstabisolatoren bestehen aus einem GFK-Kern und einer flexiblen Polymerhülle, die z.B. aus EPD oder Silikon mit variablem Schirmprofil bestehen kann. Metallarmaturen sorgen für den mechanischen Anschluss. Verbundisolatoren mit Silikonhülle können bis in die höchsten Spannungsebenen als einteiliger Langstab eingesetzt werden und verfügen im Vergleich zu Porzellanisolatoren über ein ausgezeichnetes Fremdschichtverhalten und die gleiche hohe mechanische Festigkeit. Aus diesen Gründen wird fast ausschließlich Silikon eingesetzt. Für die Herstellung werden unterschiedliche Ansätze verwendet. So werden z.B. die Metallarmaturen auf den GFK-Stab gecrimpt und in einer Form mit dem entsprechenden Schirmprofil mit einem Silikon umspritzt. Gerade unter Verwendung eines LSR sind hier kurze Prozesszeiten möglich. Nachteilig sind aber die immer vorhandenen Formtrennnähte in Längsrichtung. Bei einem alternativen Verfahren werden die GFK-Stäbe zunächst in einem Endlosprozess durch einen Extruder mit einer Silikonhülle überzogen und dann abhängig von der Betriebsspannung auf die notwendige Länge geschnitten. Im nächsten Schritt werden die Schirme aufgezogen und durch Vulkanisation chemisch mit der Hülle verbunden. Die Armaturen werden dann auf die freigelegten Enden des GFK-Stabes gecrimpt und gegenüber Umwelteinflüssen versiegelt. Dieses Verfahren ist zwar ein aufwendigerer Prozess, vermeidet aber Formtrenn-

nähte und erlaubt flexibel änderbare Schirmprofile. So kann der Kriechweg durch das Schirmprofil auf die am Einsatzort herrschenden Fremdschichtbelastungen angepasst werden. Das Schirmprofil eines Langstabisolators hat einen signifikanten Einfluss auf dessen Freiluftverhalten. Klassisch wird der Kriechweg durch zusätzliche Rippen auf der Schirmunterseite vergrößert, um Kriechströme auch bei höchsten Fremdschichtbelastungen zu vermeiden (**Abbildung 4.1**).

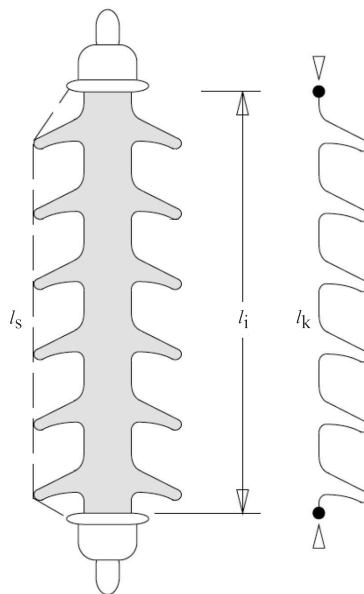


Abbildung 4.1.: Modell eines Isolators zur Definition von Schlagweite  $l_s$ , Länge  $l_i$  und Kriechwege  $l_k$  nach [Küc09]

Beliebige Verhältnisse von  $l_s$  und  $l_k$  sind aber nicht sinnvoll, sondern müssen optimiert werden [Sei05],[Sei07]. Andererseits können Schirme von Verbundisolatoren auch bewusst aerodynamisch optimiert ausgelegt werden, um eine Anlagerung von Fremdschichten gezielt zu vermeiden. Besonderes Augenmerk erfordert die Tripel-Zone im Bereich des Übergangs Armatur-Stab sowie die Kontaktstelle Schirm-Hülle. Gerade ersterer wird bewusst im von der Armatur geschirmten Bereich angebracht. Das Extrusionsverfahren erlaubt, vergleichbar zur Kabelherstellung, die Extrusion mehrerer Schichten, auf deren Anwendung in Abschnitt 7.1 eingegangen wird. Ziele von Feldsteuerungen an Langstabisolatoren sind [Sei11]:

- Linearisierung der Potentialverteilung entlang des Isolatorstrunks bei HVAC und HVDC, besonders im UHV-Bereich
- Vermeidung von Trockenbandentladungen unter Fremdschichtbelastungen
- Vermeidung von sogenannter Wassertropfenkorona

Erstere stellt eine globale Steuerung am Isolator dar. Diese nichtlineare Potentialverteilung wird durch die am Isolator angreifenden Erdkapazitäten  $C_E$  verursacht, da

diese größer sind als die kapazitive Kopplung  $C_L$  zum Leiterseil. Das der Literatur entnommene Modell ist in **Abbildung 4.2** gezeigt.

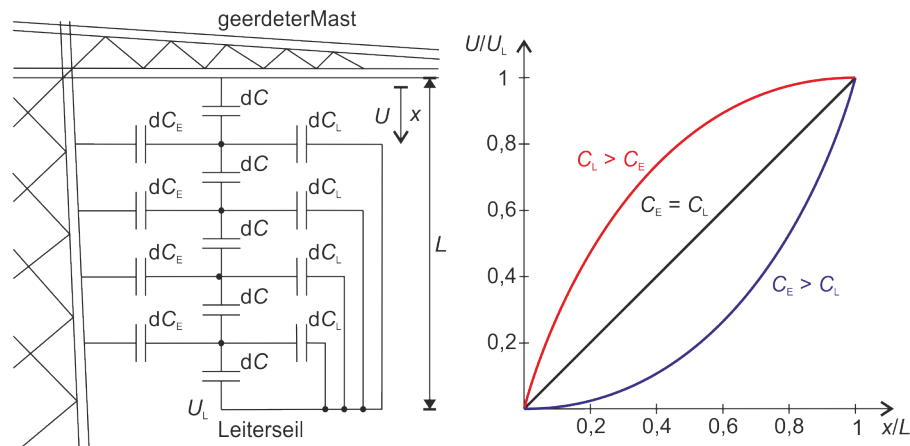


Abbildung 4.2.: Modell zur Entstehung der nichtlinearen Potentialverteilung (rot) längs des Isolators aufgrund der großen Erdkapazitäten  $C_E$  (frei nach: [Bey86]).

Dagegen handelt es sich bei der Unterdrückung von Wassertropfenkorona um eine rein lokale Steuerung. Die Vermeidung von Trockenbandentladungen erfolgt zunächst lokal, beeinflusst aber die Potentialverteilung des ganzen Isolators und stellt somit auch eine globale Steuerung dar. Zur Reduzierung der starken kapazitiven Verkopplung durch die angreifenden Erdkapazitäten wird die Potentialverteilung entlang des Strunkes meist durch Koronaringe linearisiert. Sie entlasten zusätzlich die hochspannungsseitige Tripel-Zone am Übergang Armatur-Strunk, da ein Toroid theoretisch in seinem Zentrum feldfrei ist. Die Koronaringe selbst werden für die jeweilige Anwendung durch Feldsimulationen optimiert.

Das Phänomen der Trockenbandentladungen wird mit **Abbildung 4.3** erklärt. Sie entwickeln sich an stark verschmutzten Isolatoroberflächen, die z.B. durch Industriebelastungen oder in Küstenregionen entstehen. Diese werden unter Feuchtigkeit - Betauung, Beregnung - partiell leitfähig und damit zu Äquipotentialflächen, die einen Strom längs der Isolatoroberfläche führen, Bild a). Auf den Umfang bezogen ist die Stromdichte an den Rändern der trockenen Bereiche am höchsten. Die dort entstehende Erwärmung trocknet die Fremdschicht und führt zu einer Verbreiterung der Trockenzone entlang des Umfangs, Bild b). Sobald sich die Trockenzone um den Umfang ausgedehnt hat, liegt eine Spannung über ihr an, Bild c). Eine entsprechend hohe Potentialdifferenz vorausgesetzt schlägt die Trockenzone nun über, Bild d). Der nun fließende Strom führt zu einer Erwärmung in den Fußpunkten des Entladung, Bild e). Als Folge vergrößert sich die Trockenzone auch längs des Isolators. Möglich ist nun sowohl ein Erlöschen der Entladung als auch ein vollständiger Überschlag des Isolators, da sich mehrere dieser Bereiche verbinden können und sich gleichzei-

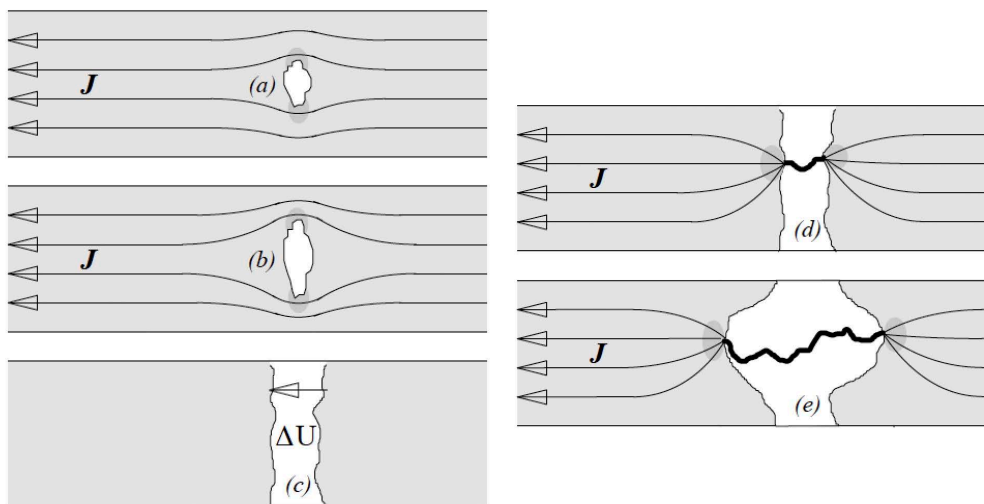


Abbildung 4.3.: Entwicklung eines Fremdschichtüberschlags an einer Isolatoroberfläche. Die Erläuterung erfolgt im Text (Quelle: [Küc09]).

tig der bezogene Spannungsbedarf der Entladung immer stärker verringert. Generell wird das Fremdschichtverhalten durch eine Anpassung des Kriechweges und der Schirmform verbessert. Entladungen, die an Elektrolyten auf Isolierstoffoberflächen entstehen, sind immer dann besonders schädlich, wenn sie lokal stabil brennen können und so zu einem Hydrophobieverlust, Kriechspuren und grabenden Erosionen führen. Das Verhalten eines Isolierwerkstoffes bei solchen Belastungen wird durch Versuche an Materialproben, z.B. in einem Schiefe-Ebenen-Test (siehe [IEC 60587]) oder in einer Prüfung der Lichtbogenbeständigkeit (siehe [IEC 61621]) getestet. Zusätzlich werden Isolatorbauarten (siehe [IEC 62217]) geprüft, wie z.B. im Radtest oder in einer Salznebelkammer. Der Radtest bildet eine zyklische Belastung für  $T = 1000$  h nach, wobei der Prüfisolator immer wieder befeuchtet und während des Abtrocknens teilweise elektrisch belastet wird. Salznebelprüfungen werden für  $T = 1000$  h (konstante Beneblung) und  $T = 5000$  h (zyklische Belastung) durchgeführt. Da letzterer ebenfalls Trocknungsphasen enthält, wird nur im 1000 h-Versuch gezielt die Hydrophobie des Isolators unterdrückt.

Zur Unterdrückung von Trockenzonenüberschlägen an Porzellanisolatoren wurden in der Vergangenheit halbleitende Glasuren von der Firma NGK Insulators LTD entwickelt [Miz99]. Diese basierten auf einem schwach leitfähigen Zinnoxid, das einen konstanten Stromfluss von  $I = 0,5\text{--}1$  mA ermöglichen soll, um die Fremdschicht auf der Oberfläche abzutrocknen. So werden Trockenzonenüberschläge bei schweren Fremdschichtbelastungen gezielt vermieden. Zusätzlich überbrückt der



Belag die Fremdschicht galvanisch und verhindert so einen zu hohen Spannungsfall über der Fremdschicht. Der Kriechweg kann an einem solchen Isolator dann verringert werden. Weiterhin wird die Potentialverteilung längs des Isolators gleichmäßiger, da der Einfluss der angreifenden Erdkapazitäten verringert ist. Dieser Effekt ist allerdings nur marginal [Els00]. Eine erfolgreiche Wirkungsweise konnte mit diesen Isolatoren gezeigt werden. Allerdings haben sie sich nicht durchgesetzt, da die Applizierung der Glasur sehr schwierig ist und die Isolatoren dadurch generell anfällig für Korrosion wurden. Zusätzlich führt der dauerhaft fließende Strom zu thermischen Problemen. Allerdings stellt eine solche Maßnahme bei Gleichspannung die einzige Möglichkeit einer effektiven Feldsteuerung dar.

## 4.2. Endenglimmschutz rotierender elektrischer Maschinen

Die Isolation einer rotierenden elektrischen Maschine stellt ein äußerst komplexes System dar, das zum einen hohen thermischen und mechanischen Belastungen standhalten und zum anderen möglichst kompakt aufgebaut werden muss, um einen hohen Wirkungsgrad der Maschine zu erzielen. Während die Innenpotentialsteuerung den Leiter zur Hauptisolation abrundet und damit diese gezielt entlastet, schließt der geerdete Außenglimmschutz (AGS) Hohlräume zwischen Hauptisolation und Blechpaket kurz. Im Wickelkopf der Maschine bildet das Ende des AGS auf der Leiterisolation eine typische Gleitanordnung (siehe **Abbildung 4.4**).

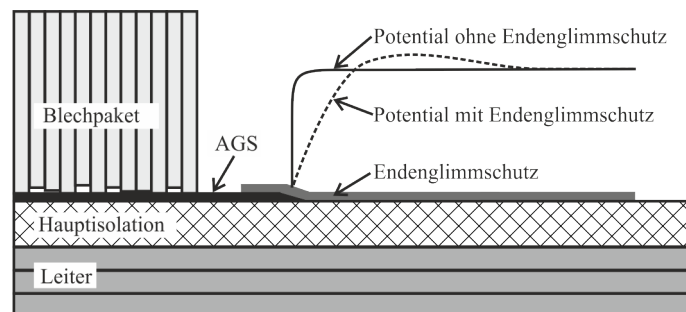


Abbildung 4.4.: Schematische Darstellung des Wickelkopfes einer elektrischen Maschine mit den Potentialverläufen an der Oberfläche der Hauptisolation, die sich mit und ohne EGS ergeben, frei nach [Kau02],[Bra08]

An dieser Tripel-Zone sind Teilentladungen während des Betriebes zu vermeiden, da diese Ozon und damit Erosionen verursachen, was zu einem frühzeitigen Ausfall der Maschine führt. Zudem besteht die Gefahr des Isolationsüberschlags durch die Gleitentladungen. Zulässig sind hier Feldstärken von  $E_{\max} = 3\text{--}4 \text{ kV/cm}$ . Die Steuerung durch einen sogenannten Endenglimmschutz (EGS) ist daher bei

Maschinen mit einer Nennspannung  $U_n \geq 5 \text{ kV}$  notwendig [Rob95]. Der EGS ist der kritischste Teil des Isoliersystems einer elektrischen Maschine. Er muss während des Betriebes Teilentladungen unterdrücken und externen Erwärmungen standhalten. Seine elektrische Auslegung erfolgt im Wesentlichen im Hinblick auf die elektrische Prüfung bei  $U_P = 2U_n + 1 \text{ kV}$  [IEC 60034-1]. Die Potentialverteilung an der Oberfläche des Wicklungsstabes muss soweit linearisiert werden, dass es während der einminütigen Typprüfung zu keinem Überschlag oder einer Überhitzung der Steuerschicht kommt. Nach dieser Prüfung sind 70 % des EGS redundant. Wichtig ist aber nicht, möglichst wenig Material zu verwenden, sondern eine einfache und reproduzierbare Applikation der halbleitenden Schicht [Rob95] [Bau11]. Besonders zu beachten ist weiterhin, dass die Steuerung nicht nur bei  $U_n$  bzw.  $U_P$  wirken muss, sondern auch für die Teilspannungen, die an den einzelnen Teilleitern einer Wicklung anliegen. Abgeschätzt werden kann die notwendige Länge des Endenglimmschutz nach Gleichung 4.1 ([Kel67a]), die der analytischen Lösung in Gleichung 2.18 für nichtlineare Feldsteuerungen entspricht:

$$l_{\text{EGS}} = \frac{U_P - 10}{3} \quad l \text{ in cm} \quad U_P: \text{Effektivwert der Prüfspannung in kV} \quad (4.1)$$

Generell ist es auch möglich, den Endenglimmschutz komplett auf der Isolati-on im Wickelkopf aufzubringen, um Entladungen in Hohlräumen zu vermeiden, die sich z.B. zwischen den Stäben und Stützelementen nie ganz vermeiden lassen [Bau11]. Die Steuerwirkung des EGS erfolgt also sowohl lokal als auch global. SiC-gefüllte Lacke und Bänder werden als Endenglimmschutz bis  $U_n \leq 30 \text{ kV}$  seit Jahrzehnten eingesetzt. Ein grundsätzliches Problem ist allerdings die Verfügbarkeit des SiC mit gleichbleibender elektrischer Charakteristik. Anwender bevorzugen Bänder, da diese einfacher zu applizieren sind und in ganzgetränkten Maschinen bis  $U_n = 21\text{--}23 \text{ kV}$  eingesetzt werden können, was mit Lacken bei diesen Systemen nicht möglich ist. Lacke haben neben der manuellen Applikation den Nachteil, dass jede Schicht ausgehärtet werden muss, bevor eine weitere Lage aufgebracht werden kann. Aus diesem Grund sind sie aber für Maschinen mit höheren Spannungen von Vorteil, weil sich leicht Schichten unterschiedlicher elektrischer  $U$ - $I$ -Charakteristiken aufbringen lassen. So sind gestufte Anordnungen aus drei bis fünf Lagen möglich. Kritischer ist hier eher eine Überhitzung des Lackes in diskreten Heißpunkten als entstehende Oberflächenentladungen [Kel67a], [Bra08], [Bau11] und [Wei11c].

Generelles Ziel der Hersteller sind Isolationssysteme der Klasse H ( $180^\circ\text{C}$ ). Bei diesen Temperaturen müssen die mechanischen Eigenschaften und die elektrische Charakteristik des Endenglimmschutzes gleichermaßen stabil sein. In jüngeren Veröffentlichungen wird als Alternative ein dotiertes Zinnoxid vorgestellt, das auf

Glimmerplättchen appliziert ist [Kem11]. Aufgrund dieser Struktur weist die elektrische Leitfähigkeit eine hohe Anisotropie auf, was für eine Feldsteuerschicht aber kein Nachteil ist. Mit dieser Technologie können Widerstände über einen weiten Bereich eingestellt werden, die auch für antistatische Beschichtungen eingesetzt werden können. Im Falle des vorgestellten Endenglimmschutzes werden aber nicht solch hohe Nichtlinearitätsexponenten  $\alpha$  erreicht, wie sie mit Mikrovaristoren möglich sind.

### 4.3. Feldsteuerungen in Mittelspannungskabelgarnituren

Garnituren werden in Muffen sowie Freiluft- und Innenraumendverschlüsse unterschieden. Während für Hochspannung  $U_m > 52 \text{ kV}$  vorwiegend geometrische Steuerungen eingesetzt werden, sind in der Mittelspannung meist resistive und kapazitive Feldsteuerungen in aufschieb- und aufschrumpfbaren Isolierkörpern üblich. Da beide Technologien auf rußgefüllten Feldsteuerelementen beruhen, spielen meist beide Varianten eine Rolle [Str03]. Die Frequenzabhängigkeit solcher Systeme bewirkt, dass sich das FSE für Betriebsspannungen zwar resistiv-kapazitiv verhält, für Stoßspannungen aber rein permittiv, was nachteilig ist in Bezug auf die Verluste im Betrieb. Wenn auch, im Falle eines Freiluftendverschlusses, äußere Gegebenheiten die Länge der Garnitur bestimmen, ist doch mit einem refraktiven Feldsteuerelement gegenüber einer geometrischen Steuerung eine bessere Ausnutzung der Isolierstrecke sowie ein kompakteres Design unter Materialeinsparung möglich. Anforderungen an ein refraktiv steuerndes Feldsteuermaterial während des Betriebes sind [Nel84]:

- Relative Permittivität:  $\epsilon_r = 25-40$
- Elektrische Festigkeit:  $E_d > 47 \text{ kV/cm}$
- Maximale elektrische Feldstärke im Material:  $E_{\max} < 6 \text{ kV/cm}$
- Maximale Dehnung:  $\epsilon_{\max} = 450 \%$

In [Hav00a] wird eine maximale Feldstärke im Bereich von  $E_{\max} = 2-5 \text{ kV/cm}$  angegeben, um einsetzende Teilentladungen verhindern zu können. Berücksichtigt werden muss weiterhin, dass eine zu hohe relative Permittivität des FSE einen negativen Einfluss auf die Wechselspannungsfestigkeit sowie die Teilentladungsaussetzspannung hat. Gleichfalls kann eine Anisotropie des  $\epsilon_r$  auftreten, die in der Herstellung und den geometrischen Abmessungen begründet sein kann [Nel84].

Mittelspannungsendverschlüsse mit einem mikrovaristorgefüllten Feldsteuerelement wurden erstmals im Jahr 2000 in [Hav00b] und [Str00] für Nennspannungen  $U_n \leq 42 \text{ kV}$  vorgestellt. In diesen ist eine Feldsteuerschicht in einem thermisch

aufschumpfbaren Polyethylen (PE)-Schlauch eingebettet, die auf der kompletten Garniturenlänge auf der Kabelisolierung angebracht wird. Die durch das neue Material erreichte resistive Steuerung wird mit konventionellen rußgefüllten Systemen verglichen. Eine Optimierung hinsichtlich zusätzlicher refraktiver Steuermöglichkeiten wird bei einer relativen Permittivität von  $\epsilon_r = 5$  nicht erwähnt und bleibt unter den in Abschnitt 3.2.3.2 beschriebenen Möglichkeiten. Zusätzlich wird in [Str01b] und [Str01c] eine Garnitur gezeigt, die durch eine mikrovaristorgefüllte *Mastik* die Tripel-Zone entlastet und über eine äußere Silikonhülle verfügt. Die Garnituren sind in **Abbildung 4.5** dargestellt. Die FSE haben in beiden Fällen einen Schaltpunkt von  $E_b = 14 \text{ kV/cm}$  und können somit nicht auf die geforderten maximalen Feldstärken begrenzen (s.o.). Bei beiden Anwendungen werden bewährte Materialien für die äußere Hülle verwendet, die allen Freiluftanforderungen genügen. Dementsprechend werden die Garnituren kommerziell angeboten. Entsprechend der beschriebenen Kennlinie wird, auch für erhöhte Wechselspannung und Bemessungsblitzstoßspannung, eine äußerst strikte Begrenzung der maximal an der Garnitur auftretenden Feldstärke vorausgesetzt (siehe Abschnitt 3.2.3).

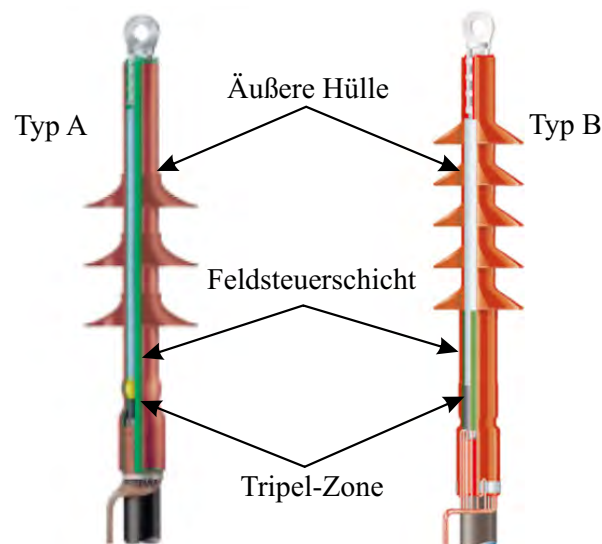


Abbildung 4.5.: Auf dem Markt erhältliche mikrovaristorgefüllte Endverschlüsse; Beschrieben in [Str01b]

Parallele Entwicklungen wurden mit einem mikrovaristorgefüllten Silikon als Feldsteuerelement untersucht, das in Hochspannungs-Aufschiebeendverschlüssen -  $U_m = 123 \text{ kV}$  [Gra03c]<sup>11</sup> bzw.  $U_m = 84 \text{ kV}$  [Don04] - integriert wurde. Auch wenn keine vollständige Typprüfung nach [IEC 60840] durchgeführt wurde, zeigen die durchgeführten Prüfungen mit Wechsel- und Blitzstoßspannung, dass eine ausreichende Steuerung des elektrischen Feldes möglich ist. Es erfolgt allerdings kein

---

<sup>11</sup> Ähnliche Darstellungen sind [Gra03a] und [Gra03b] zu entnehmen

Vergleich mit konventionellen Garnituren, der direkte Vorteile, wie z.B. ein kompakteres Design oder eine höhere Stoßspannungsfestigkeit, zeigt. Die dargestellten Simulationen der Verhältnisse bei Bemessungs-Blitzstoßspannung zeigen sehr deutlich die Wirkungsweise einer mikrovaristorgefüllten Feldsteuerschicht und deren hoher Nichtlinearität im Bereich des Schaltpunktes. So geht das Verhalten des FSE mit ansteigender Stoßspannung vom kapazitiven in den leitfähigen Bereich über und begrenzt so die anliegende Feldstärke. Gleichzeitig sind die thermischen Verluste bei Betriebsspannung sehr gering, da die Feldstärken dann weit unter dem Schaltpunkt liegen. Leider wird aber nicht angegeben, wie gut die verwendete Software AceTripleC die nichtlineare  $\sigma(E)$ -Kennlinie verarbeiten kann.

Gemeinsam ist aber allen vorgestellten Veröffentlichungen, dass weder nachvollziehbar begründet wird, welche Kennlinie des Mikrovaristorpulvers für ein FSE in einer Kabelgarnitur notwendig ist, noch werden Untersuchungen zur Kennlinienvariation beschrieben.

#### **4.4. Simulation der Anwendungen mikrovaristorgefüllter Feldsteuerelemente**

Im Folgenden soll eine Literaturübersicht den aktuellen Stand der rechnergestützten Simulationen zeigen, mit denen Anwendungsmöglichkeiten mikrovaristorgefüllter Polymere untersucht wurden. Zunächst wird ein allgemeiner Überblick der aktuellen Literatur gegeben. Im zweiten Teil werden die an der HSU Hamburg bzw. der BU Wuppertal gefundenen Erkenntnisse zusammenfasst, die im Rahmen des gemeinsamen AiF-Projektes Nr. 15455N simuliert worden sind (siehe [Wei11a]).

Ein neuartiges Konzept für eine Garnitur mit  $U_m = 145 \text{ kV}$  und einem Verbundhohlisolator wird in [Boe01b] vorgestellt, der über eine zusätzliche mikrovaristorgefüllte Silikonschicht verfügt. Diese Kombination mit einem konventionellen Silikon wird, wie in Abschnitt 3.2.3.2 beschrieben, auf ihre Eignung hin untersucht. Allerdings wird der Hohlisolator als Gehäuse für eine Kabelgarnitur eingesetzt, die noch über eine konventionelle geometrische Steuerung verfügt. So zeigen sich zwar Vorteile mikrovaristorgefüllter FSE, aber es ist nicht das volle Potential einschließlich der konstruktiven Grenzen erkennbar.

In [Don07] werden  $\text{SF}_6$ -gefüllte Durchführungen für  $U_m = 145 \text{ kV}$  und  $U_m = 550 \text{ kV}$  betrachtet, bei denen eine mikrovaristorgefüllte Feldsteuerschicht eine konventionelle Steuerelektrode ersetzt. Sie setzen sich damit von den zuvor betrachteten Garnituren ab, in denen die mikrovaristorgefüllten Elemente nur ergänzend eingesetzt werden. Die Länge der Feldsteuerschicht wird nach  $L \geq U_P / E_b$  mit der höchsten Prüfspannung  $U_P$  und einem Schaltpunkt  $E_b \approx 12 \text{ kV/cm}$  bestimmt. Auf Grundlage welcher Anforderungen diese ausgewählt worden sind, wird ebenso

wenig dargelegt wie die geometrischen Abmessungen der Feldsteuerschicht. Die Simulationen zeigen ebenfalls den schon beschriebenen Übergang von einer refraktiven zu einer resistiven Steuerung.

Ein Ansatz für den Einsatz mikrovaristorgefüllter Feldsteuerelemente in Verbundisolatoren wird in [AR10] und [AR12b] vorgestellt. Untersucht werden Verbundisolatoren für  $U = 11 \text{ kV}$ , die im Bereich der Armaturen mit mikrovaristorgefüllten Silikonen ausgestattet sind. Die Isolatoren sind mit einer Schlagweite von  $l_s = 160 \text{ mm}$  sehr kurz. An diesen Modellen wird das elektrothermische Verhalten bei Wechsel- und Stoßspannungen im trockenen und verschmutzten Zustand untersucht. Basierend auf einer gemessenen Kennlinie des Materials nach [Sil13e] werden Kennlinienvarianten mit niedrigerem Schaltpunkt  $E_b = 0,5 \text{ kV/cm}$ ,  $1 \text{ kV/cm}$  und  $5 \text{ kV/cm}$  nachgebildet. Eine Schwäche ist allerdings der gemeinsame Startpunkt der Kennlinien, was in allen Fällen ähnliche Leckströme bedeutet. Dieser Zusammenhang kann messtechnisch widerlegt werden (siehe Kapitel 6.2.5). Entsprechend dieser nichtlinearen Charakteristik kann die Tripel-Zone an den Armaturen mit den mikrovaristorgefüllten Materialien entlastet werden. Diese fällt beim geringsten Schaltpunkt logischerweise am höchsten aus, führt aber zu einer Verlagerung der hohen Feldstärken in den mittleren Bereich der Isolatoren. Ein Schaltpunkt von  $E_b = 1 \text{ kV/cm}$  wird aufgrund der gleichmäßigsten Feldverteilung als optimal ausgewählt. Dieses Material scheint in der Lage zu sein, auch am simulierten verschmutzten Isolator eine Reduzierung der elektrischen Feldstärken an den Enden erreichen zu können. Gleichermaßen scheint eine reduzierte Erwärmung dieses Isolators möglich zu sein.

Moderne Simulationsrechnungen ermöglichen die Optimierungen der konstruktiven Abmessungen von energietechnischen Systemen sowie die Untersuchungen neuer Technologien. Aufwendig werden die Simulationsrechnungen, wenn nicht-lineare Materialparameter, wie z.B. die Leitfähigkeit eines mikrovaristorgefüllten Feldsteuerelementes berücksichtigt werden müssen, deren Abmessungen zudem klein gegenüber den Dimensionen des Gerätes ist. [Wei11b] zeigt die Variation der Länge und Dicke eines mikrovaristorgefüllten Feldsteuerelementes (FSE) bei  $U = 40 \text{ kV}$  in einem Modellendverschluss (Abbildung A.11). Die Auswertung von tangentialer ( $E_t$ ) und normaler Komponente ( $E_n$ ) des elektrischen Feldes in Abhängigkeit der Länge des FSE erfolgt an der Oberfläche der äußeren Silikonhülle und ist in **Abbildung 4.6** dargestellt.

Dabei überlappt das FSE für  $l_r = 30 \text{ mm}$  die äußere Leitschicht des Kabels (siehe Abbildung A.11). Für die Beurteilung der Entwicklung von Gleitentladungen ist vor allem die tangentielle Feldstärke  $E_t$  relevant. Abbildung 4.6 links zeigt, dass die Gesamtlänge des FSE ab  $l_e = 60 \text{ mm}$  in dieser Konfiguration keinen Einfluss mehr auf die maximale tangentielle Feldstärke  $E_t$  hat. Diese wird aber nicht geringer

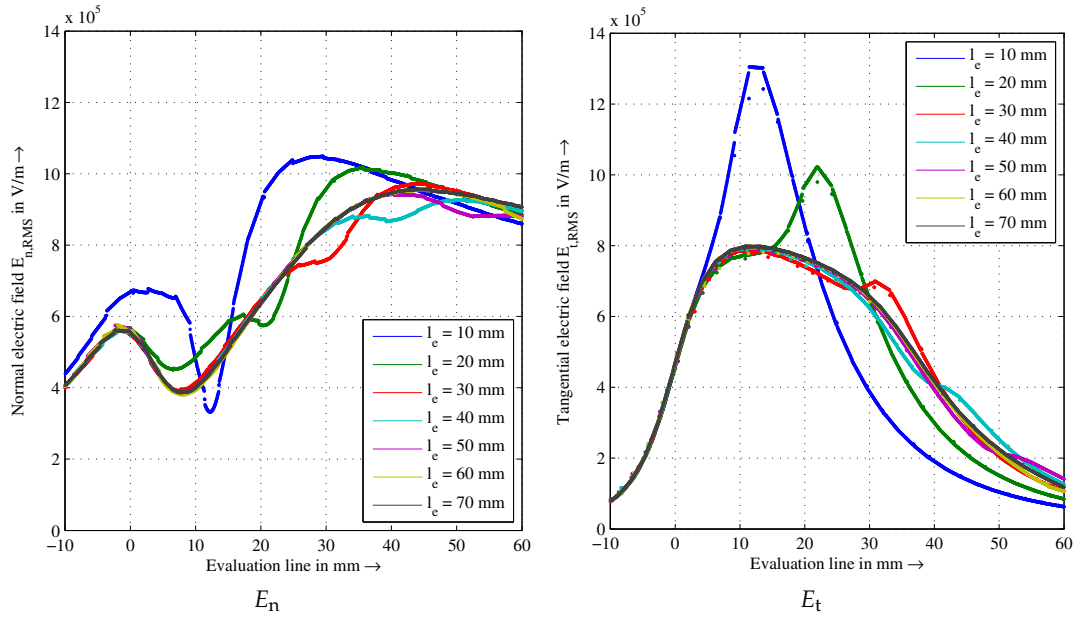


Abbildung 4.6.: Einfluss der Länge  $l_e$  eines mikrovaristorgefüllten Feldsteuerelementes mit  $E_b \approx 1200 \text{ V/mm}$  auf die tangentielle und normale elektrische Feldstärke bei  $U = 40 \text{ kV}$  entlang der Garnitur [Wei11b]

als  $E_t = \sqrt{2} \cdot 8 \text{ kV/cm} = 11,2 \text{ kV/cm}$ , was näherungsweise dem Schalterpunkt des simulierten mikrovaristorgefüllten Feldsteuerelementes entspricht. Vielmehr bildet der Verlauf der elektrischen Feldstärke ein für stark nichtlineare Materialien typisches Plateau aus. Gleichmaßen zeigt sich, dass die Normalkomponente an der Oberfläche generell etwas höher ist als die tangentielle Feldstärke. Die Variation der Dicke des FSE zeigt in **Abbildung 4.7 links**, dass sie nur im Bereich der Tripel-Zone einen gewissen Einfluss hat, aber ab einer Länge von  $l = 60 \text{ mm}$  des kompletten FSE einen geringen Einfluss auf die elektrische Feldstärke. Dagegen hat die Dicke einen größeren Einfluss auf die im FSE umgesetzten Verluste (**siehe Abbildung 4.7 rechts**) [Wei11b].

Mit den gleichen Simulationstools werden in [Wei10] mikrovaristorgefüllte und konventionelle SiC-gefüllte Endenglimmschutzsysteme miteinander verglichen. Simuliert werden im Vergleich zu den in Kapitel 8 untersuchten Modellstäben etwas schmalere Varianten. Der mikrovaristorgefüllte Lack verfügt dementsprechend über einen Schalterpunkt  $E_b = 600 \text{ V/mm}$ . Ein gerechnetes Beispiel für den Verlauf der elektrischen Feldstärke und des Potentials an der Oberfläche bei  $U_P = 33 \text{ kV}$  ist in **Abbildung 4.8** dargestellt.

Die in Abschnitt 2.2.3.2 für (nichtlinear-)resistive Feldsteuerungen beschriebenen typischen Phasenverschiebungen zwischen dem Oberflächenpotential und der anliegenden Prüfspannung ist in den resultierenden Überschwüngen zu erkennen. Dieser

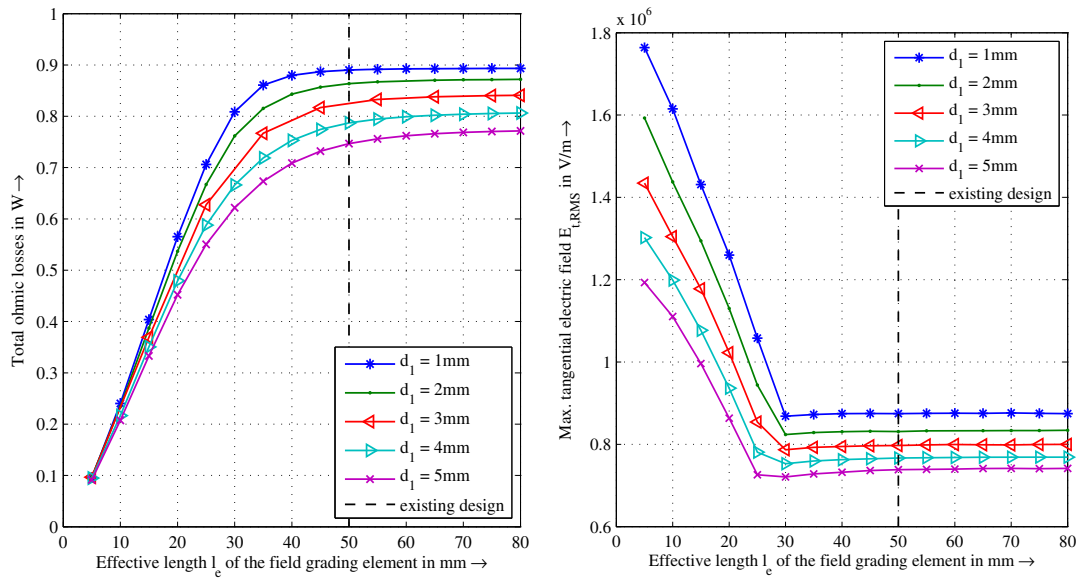


Abbildung 4.7.: Links: Simulierte Abhängigkeit der tangentialen Feldstärke  $E_t$  von der Dicke  $d_1$  und der Länge  $l_e$  eines mikrovaristorgefüllten Feldsteuerelementes. Rechts: In dem FSE umgesetzte Verluste in Abhängigkeit der Dicke und Länge, nach [Wei11b]

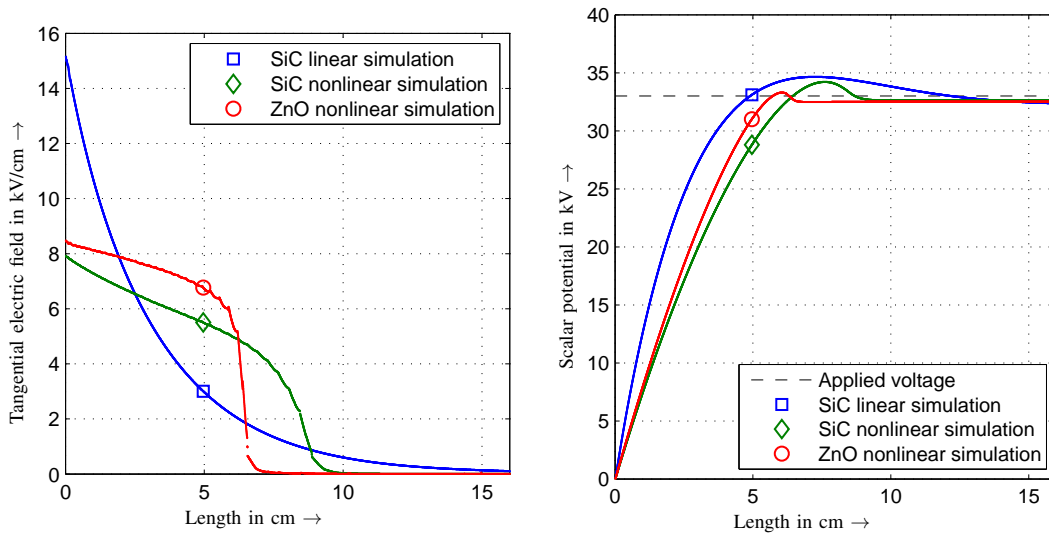


Abbildung 4.8.: Vergleich eines mikrovaristorgefüllten Endenglimmschutzes mit einem konventionellen System. Links:  $E_t$ , Rechts:  $\phi$  an der Oberfläche des Endenglimmschutz [Wei10]



ist beim mikrovaristorgefüllten Lack im Vergleich zum konventionellen System lokal deutlich kürzer und nicht so hoch ausgebildet. Dieser Unterschied ist abhängig vom Nichtlinearitätsexponenten  $\alpha$  der Feldsteuerschicht und wird in [Kel67a] beschrieben. Direkt am Übergang vom Außenglimmschutz (AGS) zum Endenglimmschutz (EGS) wird für die mikrovaristorgefüllte Steuerung mit  $E_{\max} = 8,5 \text{ kV/cm}$  eine im Vergleich zum SiC-gefüllten System -  $E_{\max} = 8 \text{ kV/cm}$  - etwas höhere elektrische Feldstärke berechnet. Entlang der Oberfläche ist diese ebenfalls höher, allerdings ist der Abfall der elektrischen Feldstärke auffällig, da er, charakteristisch für die nichtlineare Kennlinie, deutlich abknickt. Der Einfluss der verwendeten Gleichspannungskennlinie auf die Simulationsergebnisse wird Kapitel 8 beschrieben. Dagegen zeigen konventionelle Systeme mit einer geringeren Nichtlinearität einen gleichmäßigeren Abfall. Die in beiden Fällen relativ hohe Feldstärke am Übergang AGS-EGS ist darin begründet, dass deren real vorhandene Überlappung im Simulationsmodell nicht berücksichtigt wird.

Aufgrund der Dimensionen bieten sich besonders Verbundlangstabisolatoren mit mikrovaristorgefüllten Silikonelementen für Simulationsrechnungen an. [Wei08a] beschreibt die Simulation eines Verbundlangstabisolators mit einer Länge von  $l = 930 \text{ mm}$  bei einer Spannung  $U = 408 \text{ kV}$ . Die Simulation ermöglicht dabei die Berücksichtigung von Freileitung und geerdetem Mast. Verwendet wird, wie bei den Kabelgarnituren, die Gleichspannungskennlinie des Materials nach [Sil13e]. Wie in **Abbildung 4.9** zu sehen ist, zeigt sich, dass auch auf Basis dieser DC-Charakteristik eine Vergleichmäßigung der Potentialverteilung entlang der Isolatoroberfläche möglich ist. Mit der verwendeten Software können aber auch leitfähige Fremdschichten simuliert werden [Wei08b]. Die mikrovaristorgefüllten Feldsteuerschichten können nicht nur in 3D, sondern auch in 2D simuliert werden. Gezeigt wird das in [Wei09] an Verbundlangstabisolatoren mit  $U_m = 420 \text{ kV}$ . Allerdings zeigen sich hier am hochspannungsseitigen Ende im Vergleich zu einem konventionellen Isolator höhere Feldstärken, die darin begründet sein können, dass das Material bei  $U_p = 750 \text{ kV}$  zu leitfähig wird. Im Weiteren können Berechnungsversuche an den Isolatoren berechnet werden, wenn auch keine Berücksichtigung von Entladungen erfolgt [Wei10]. Es werden mikrovaristorgefüllte Silikone in Strünken und Schirmen untersucht. Quantitative Unterschiede sind aber nicht zu erkennen. In keiner der vorgestellten Untersuchungen findet jedoch eine Variation der nichtlinearen Kennlinie der mikrovaristorgefüllten Elemente statt.

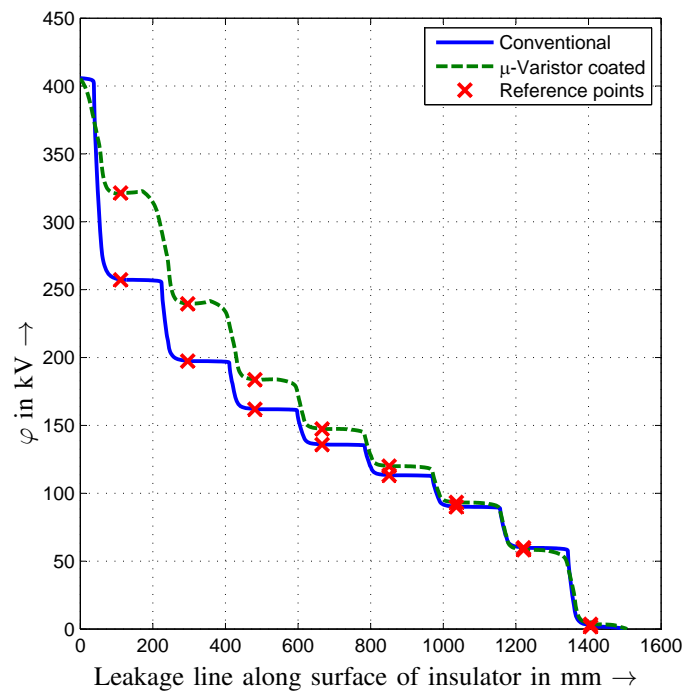


Abbildung 4.9.: Vergleich der Potentialverteilung zwischen einem konventionellen Isolator und einem solchen mit mikrovaristorgefüllter Hülle, nach [Wei08a]

## 5. Ziele der Arbeit

Mikrovaristorgefüllte Polymere sind Verbundwerkstoffe, die die mechanischen Eigenschaften von Polymeren mit der nichtlinearen intrinsischen  $U$ - $I$ -Kennlinie von dotiertem Zinkoxid verbinden. *Mikrovaristoren* stellen somit einen funktionalen Füller dar. Geeignete Prüfverfahren für derartige Verbundwerkstoffe sind nicht standardisiert, sondern hersteller-/anwenderspezifisch. Im Rahmen der Untersuchung der mikrovaristorgefüllten Polymere können sie der Isolierstoff- und Varistortechnik entlehnt werden. Im Weiteren müssen für die Auslegung der jeweiligen Anwendungen wichtige Einflussfaktoren, wie z.B. Temperatur oder mechanische Dehnung auf die elektrische Charakteristik bestimmt werden. Daher müssen zunächst folgende Aspekte der Charakterisierung **Kapitel 6** untersucht werden:

- Zunächst müssen die Prüfverfahren definiert werden, die sowohl den Isolierstoff als auch den nichtlinearen Widerstand der Mikrovaristoren berücksichtigen. Diese können zwar aus bestehenden Normen entlehnt werden, aber trotzdem sind Anpassungen der Prüfverfahren erforderlich, um den Besonderheiten der nichtlinearen Kennlinie zu genügen. Entsprechend ermöglicht die Definition von Prüfvorschriften Anwendern und Herstellern mikrovaristorgefüllter Polymere eine standardisierte elektrische Charakterisierung.
- Die Charakterisierung wird zudem bei Wechsel- und Gleichspannung durchgeführt, obwohl im Rahmen dieser Arbeit ausschließlich Wechselspannungsanwendungen betrachtet werden. Mögliche Unterschiede sind nicht nur für die Evaluierung der Anwendung selbst notwendig, sondern ermöglichen auch eine Aussage darüber, ob auch Gleichspannungskennlinien für eine Überprüfung der Materialeigenschaften verwendet werden dürfen.
- Mit den entwickelten Methoden sollen dann sowohl der Einfluss der Polymermatrix als auch des Schaltpunktes auf die Eigenschaften des Verbundmaterials untersucht werden. Diese Erkenntnisse werden sowohl für die anwendungsbezogenen Auslegungen als auch Simulationen benötigt.
- Abgeschlossen wird diese Charakterisierung durch erste Versuche, die eine Beurteilung des Langzeitverhaltens ermöglichen. In diesem Zusammenhang sind Fragen zur Verarbeitung zu klären, die eine Reproduzierbarkeit, Fertigungs-

sicherheit und ausreichende Stabilität der elektrischen und mechanischen Eigenschaften garantieren.

Aufgrund der in Abschnitt 3.2.3 beschriebenen Eigenschaften haben mikrovaristorgefüllte Polymere das Potential, bestehende Feldsteuertechniken nicht nur zu verbessern oder zu ersetzen, sondern auch neue Anwendungsmöglichkeiten zu erlauben. Grundsätzlich können sie dabei sowohl lokal als auch global zu hohe elektrische Feldbelastungen vermeiden. Basierend auf den Ergebnissen der Charakterisierung wird der Schwerpunkt der Untersuchungen auf die in Kapitel 4 beschriebenen Problemstellungen gelegt:

- Ein kompakteres Design von Verbundlangstabisolatoren ist aufgrund der möglichen Einsparungen in der Trassierung attraktiv. Dies kann durch eine optimierte, linearisierte Potentialverteilung entlang eines Langstabes erreicht werden. Dies würde eine globale Feldsteuerung des Isolators darstellen. Grundsätzlich lassen sich mit mikrovaristorgefüllten Isolierstoffen bei Verbundlangstabisolatoren auch die an Porzellanisolatoren gelegentlich genutzten Effekte halbleitender Glasuren nachbilden. Damit können Optimierungen der Potentialverteilung erreicht, sowie Trockenzonenbildung kontrolliert und insgesamt das Betriebsverhalten bei Fremdschichtbelastungen verbessert werden. Besonders interessant ist die feldsteuernde Wirkung für Gleich- und Mischspannungsbeanspruchung, wo rein kapazitiv wirkende Maßnahmen wirkungslos bleiben. Untersucht werden diese Aspekte in **Kapitel 7**.
- Heute verfügbare Endenglimmschutzsysteme bestehen aus Lacken und Bändern, die mit Siliziumcarbid (SiC) gefüllt sind. Dieser Füllstoff hat den Nachteil, dass er ein reines Nischenprodukt darstellt, dessen elektrische Eigenschaften stark streuen. Um konstante Eigenschaften zu erreichen, ist daher ein großer mess- und prozesstechnischer Aufwand notwendig. Mikrovaristoren bieten demgegenüber den Vorteil einer reproduzierbar einstellbaren Charakteristik. Geklärt wird zudem in **Kapitel 8**, wie sich die nichtlineare Kennlinie auf die thermische Stabilität der Feldsteuerung auswirkt.
- Im Hinblick auf Kabelgarnituren können mikrovaristorgefüllte Polymere Vorteile gegenüber konventionellen refraktiv oder resistiv steuernden Systemen bieten, wenn sie kompaktere Designs oder eine Anwendung bei Spannungen  $U_n > 42 \text{ kV}$  ermöglichen. Diese Vorteile sollen vor allem durch Stoßspannungsversuche und Untersuchungen zum thermischen Verhalten in **Kapitel 9** gezeigt werden.

Eine Untersuchung der Anwendungsmöglichkeiten an Modellanordnungen zeigt nicht nur die grundsätzlichen Eigenschaften sondern auch Querbezüge zwischen

---

den einzelnen Anwendungen auf. Diese Querbezüge werden in **Kapitel 10** thematisiert. Die untersuchten Anwendungen sollen zeigen, dass mit einem neuen Material wie mikrovaristorgefüllten Polymeren nicht nur bewährte energietechnische Systeme optimiert werden können, sondern dass auch neue Eigenschaften möglich werden. Der Bezug wird dabei immer zu bestehenden Systemen gezogen, um eine Grundlage zur Beurteilung zu erhalten. In allen Fällen ist zu klären, ob die mikrovaristorgefüllten Polymere sowohl global als auch lokal elektrische Felder steuern können. Die Folgen können ein optimiertes Design sein, aber auch unerlaubte Überhitzungen, wenn die umgesetzten Verluste zu hoch sind. Diese werden mittels Infrarot-Thermografie untersucht. Die sich daraus ergebenden Anforderungen an die Verarbeitung werden beschrieben und mit existierenden Feldsteuermaterialien verglichen. Schlussendlich werden die gewonnenen Ergebnisse mit eigenen und der Literatur entnommenen Feldsimulationen abgeglichen. Die geeigneten Methoden für die Simulation eines Materials mit nichtlinearen elektrischen Eigenschaften sollen gezeigt werden. Dies ist besonders wichtig, da für diese nichtlinearen Materialien noch technische Grenzen bestehen, die berücksichtigt werden müssen, aber gleichzeitig kontinuierlich weiterentwickelt werden.



## 6. Charakterisierung nichtlinearer Materialien und Systeme

Eine zuverlässige elektrische Charakterisierung der in hochspannungstechnischen Geräten eingesetzten Werkstoffe ist die Ausgangsbasis für deren Entwicklung durch Simulationsmodelle. Sie stellt zudem die Grundlage für deren Auslegung und zuverlässige Qualitätsstandards dar. Daraus ergeben sich folgende Anforderungen an eine elektrische Charakterisierung eines nichtlinearen Materials:

- Reproduzierbarkeit
- Standardisierung
- Automatisierung

Aufgrund der Temperaturabhängigkeit der Materialien ist vor allem eine definierte Messtemperatur entscheidend. Für die vorgestellten Messungen wird eine Temperatur von  $T_{\text{amb}} = 30\text{ °C}$  als Referenz verwendet, deren Einhaltung durch einen Wärmeschrank gewährleistet wird. Ein weiterer Aspekt ist die definierte Kontaktierung der Prüflinge mit einer konstanten Anpresskraft in den jeweiligen Messanordnungen. Die Automatisierung dient der systematischen Kennlinienbestimmung bei festgelegten Messzeiten. Zusätzlich zu diesen Parametern muss noch die Prüflingsgeometrie berücksichtigt werden. Im Rahmen dieser Arbeit werden folgende feldsteuernde Systeme untersucht:

- Mikrovaristorpulver (in einem Silikonöl)
- mikrovaristorgefüllte Silikonplatten
- mikrovaristorgefüllte Silikonschläuche
- mikrovaristorgefüllte Phenolharzlacke

Die Charakterisierungen selbst sind unabhängig von den eigentlichen Anwendungen der einzelnen Polymere. Allerdings muss eine Unterscheidung in Wechsel- und Gleichspannungskennlinie erfolgen (siehe Abschnitt 6.2.6). Die Messmethoden werden in Zusammenhang mit den mikrovaristorgefüllten Silikonplatten vorgestellt.

## 6.1. Charakterisierung von Mikrovaristor-Pulvern

Eine reine Mikrovaristorpulverprobe kann nicht ohne weiteres vermessen werden, da zum einen mechanische Einflüsse wie die Schüttdichte einen nicht reproduzierbaren Einfluss haben und zum anderen Teilentladungen in den Zwischenräumen auftreten können. Beide Probleme werden vermieden, wenn man ein niederviskoses Silikonöl<sup>12</sup> von der Unterseite des Probenkörpers in das Pulver diffundieren lässt. Allerdings handelt es sich dann um ein sehr hochgefülltes Polymer. Um Randfeldefekte zu vermeiden, werden die Messungen in einer Schutzringanordnung durchgeführt, deren Vorteile im Rahmen der Untersuchungen an plattenförmigen Prüflingen in Abschnitt 6.2.2 dargestellt werden. Eine entsprechende Anordnung zur Charakterisierung der Mikrovaristorpulver ist in Abbildung B.3 wiedergegeben. Der Abstand der Elektroden beträgt  $d = 5 \text{ mm}$  und die Elektrodenfläche  $A_{\text{Mess}} = 3,14 \text{ cm}^2$ . **Abbildung 6.1** zeigt den Vergleich der  $\hat{e}$ - $\hat{j}$ -Kennlinien bei Wechselspannung von drei Pulvertypen. Auf die Besonderheiten der Messung wird in Abschnitt 6.2.4 eingegangen. Typ 1 hat einen nominellen Schaltpunkt von  $E_b = 1000 \text{ V/mm}$ , Typ 2a und Typ 2b einen von  $E_b = 500 \text{ V/mm}$ , wobei allerdings Typ 2b silanisiert ist. Die

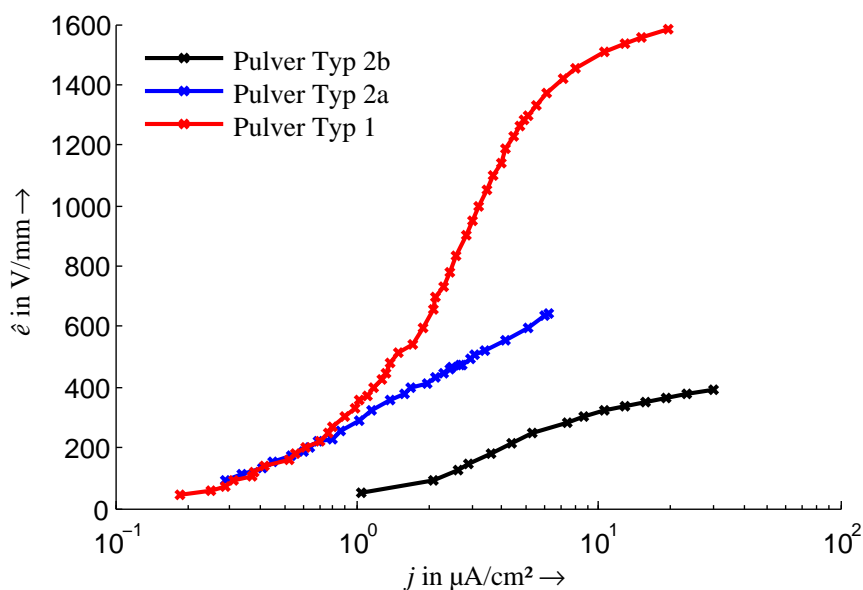


Abbildung 6.1.: Vergleich der  $\hat{e}_{\text{AC}}-\hat{j}_{\text{AC}}$ -Kennlinie dreier Mikrovaristorpulver in Silikonöl. Typ 1 und Typ 2a sind nicht silanisiert. Typ 2b ist die silanisierte Variante von Typ 2a.

Darstellung der Charakteristik als halblogarithmische  $\hat{e}$ - $\hat{j}$ -Kennlinie ist der Varistortechnik entlehnt, um die Nichtlinearität der Mikrovaristoren darzustellen. Um eine verbesserte mechanische Einbindung der Mikrovaristoren in einer Polymermatrix

<sup>12</sup>z.B. Wacker AK 10



zu erreichen, kann deren Oberfläche durch eine Silanisierung behandelt werden. Die Konsequenz ist aber eine Veränderung der elektrischen Charakteristik, da die Beschichtung selbst den Übergangswiderstand zwischen zwei Mikrovaristorpartikeln verändert. Im vorliegenden Fall führt sie offenkundig zu einer höheren Leitfähigkeit des Pulvers. Die Ursache ist ein verringerter Übergangswiderstand durch die Silanisierung des Pulvers.

## **6.2. Charakterisierung von plattenförmigen Silikon-Prüflingen**

### **6.2.1. Herstellung der Prüflinge**

Die plattenförmigen Prüflinge werden aus einem gefülltem HTV-Silikon diverser Typen im fachgebietseigenen Gießlabor mit Formen nach Abbildung A.1 gepresst. Ein Beispiel eines Prüflings ist in Abbildung A.3 gegeben. Die Vernetzung erfolgt bei einer Temperatur  $T = 175\text{ °C}$ . Eine Temperung der mikrovaristorgefüllten Silikonprüflinge bei  $T = 200\text{ °C}$  für  $t = 1\text{ h}$  wird vorgenommen, um Spaltprodukte aus dem Vulkanisat zu entfernen sowie eine Verbesserung des Druckverformungsrestes zu erreichen [Tom90]. Dementsprechend hat die Temperung einen geringen Einfluss auf die elektrische Leitfähigkeit der gefüllten Silikone, die aufgrund der stabileren Einbindung der Mikrovaristorpartikel in die Matrix zunimmt. Sie stellt zudem gleichzeitig eine Konditionierung der Prüflinge dar. Die Prüflinge haben einen Durchmesser von  $D_{\text{Prüfling}} = 100\text{ mm}$  und einer Dicke  $d_{\text{Prüfling}} = 2\text{ mm}$ , die bei der Herstellung aber auch variiert werden kann. Diese relativ großen Geometrien ermöglichen die Herstellung von homogenen Prüflingen und die Untersuchung von Volumeneffekten, die gerade aufgrund der nichtlinearen  $U$ - $I$ -Charakteristik des Materials nicht per se ausgeschlossen werden können. Zudem ist eine zuverlässigere Übertragung der Resultate im Vergleich mit den Anwendungen möglich, wenn die Prüfobjekte über ähnliche Dimensionen verfügen.

### **6.2.2. Prüfaufbau zur Charakterisierung**

Die hohe Nichtlinearität der mikrovaristorgefüllten Polymere verbietet den Einsatz einer klassischen Vierleitermethode zur Messung der Leitfähigkeit mit einer spannungsgeregelten Quelle, da das Material nur zwischen den Spannungsmesselektroden der Spannung angesteuert wird, nicht aber jeweils zwischen diesen und dem jeweiligen Kontakt der Strommessung. Durch internationale Normen sind sowohl für die Bestimmung von Oberflächen- und Volumenleitfähigkeiten [IEC 60093] als auch für die Messung der dielektrischen Eigenschaften [IEC 60250] Schutzringanordnungen vorgeschrieben. Der Schutzring schützt die Messelektrode

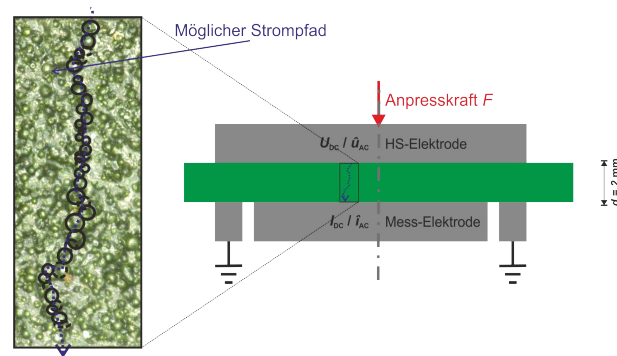


Abbildung 6.2.: Schematische Darstellung der Messanordnung mikrovaristorgefüllter Silikonplatten ( $d = 2 \text{ mm}$ ) mit zusätzlich angedeutetem möglichem Strompfad durch das Polymer

vor Oberflächenströmen und ermöglicht ein homogenes Feld im Messvolumen, was für die Bestimmung der dielektrischen Kennwerte  $\epsilon_r$  und  $\tan \delta$  sowie der Leitfähigkeit  $\sigma$  notwendig ist. Das Messprinzip ist in **Abbildung 6.2** anhand eines Querschnitts eines  $d = 2 \text{ mm}$  dicken mikrovaristorgefüllten Silikonprüflings dargestellt. Die Mikroskopaufnahme (100fach) zeigt die hohe Befüllung der Silikonmatrix. Deutlich sind die durchgängigen, stromtragenden Ketten der Mikrovaristoren zu sehen. Zur Erläuterung ist ein möglicher Strompfad eingezeichnet. Zudem fällt auf, dass die Mikrovaristoren nicht die Oberfläche durchdringen. Dies ist im Herstellungsprozess der Silikonplatten begründet (siehe auch **Abbildung A.3**). Dementsprechend ist eine definierte Kontaktierung notwendig. Eine steuerbare variable Anpresskraft wird als Lösung umgesetzt und kann durch einen pneumatischen Stempel oder eine gespannte Feder realisiert werden. Für reproduzierbare Messungen ist eine konstante Anpresskraft in der Größenordnung von  $F_A = 50 - 200 \text{ N}$  notwendig (siehe **Abbildung C.3** sowie [Dür09], [Dha13]). Alternativ können leitfähige Lacke, z.B. auf Silber- oder Graphitbasis verwendet werden. Für deren Applikation müssen die Prüflinge aber z.T. angeraut werden, wodurch ein verfälschender Einfluss entstehen kann. Eine Besputterung scheidet aufgrund der Größe aus. Basierend auf diesen Anforderungen werden zwei verschiedene Radien der Messanordnungen für die Plattenprüflinge definiert, deren Parameter in **Tabelle 6.1** angegeben werden. Die Kanten der polierten Elektroden sind nicht besonders verrundet, da Materialdurchschläge am Rand der Mess- und Schutzringelektrode nicht häufiger auftraten, als über die restliche Oberfläche verteilt (siehe Abschnitt 6.4.2). Die Anpresskraft auf die Polymerprüflinge wird durch eine Feder erzeugt. Eine etwas aufwendigere Variante kann durch eine Pneumatik umgesetzt werden. Generell ist bei der Charakterisierung darauf zu achten, dass kleine Änderungen in der Dicke und damit der anliegenden Feldstärke zu großen Änderungen der Stromdichte führen. Den praktischen Aufbau der Schutzringanordnung Typ2 zeigt **Abbildung 6.3**. [IEC 60093]

Tabelle 6.1.: Geometrische Abmessungen der verwendeten Elektrodenanordnungen

	Typ1	Typ2
$D_{\text{HS-Elektrode}}$	80 mm	36 mm
$D_{\text{Mess}}$	58 mm	22,8 mm
$D_{\text{i,Schutzring}}$	60 mm	23,8 mm
$g$	1 mm	0,5 mm
$A_{\text{Mess}} 0,25\pi \cdot (D_{\text{Mess}} + g)$	27,34 cm <sup>2</sup>	4,26 cm <sup>2</sup>
$C_0$ bei $d = 2$ mm	12,1 pF	1,89 pF

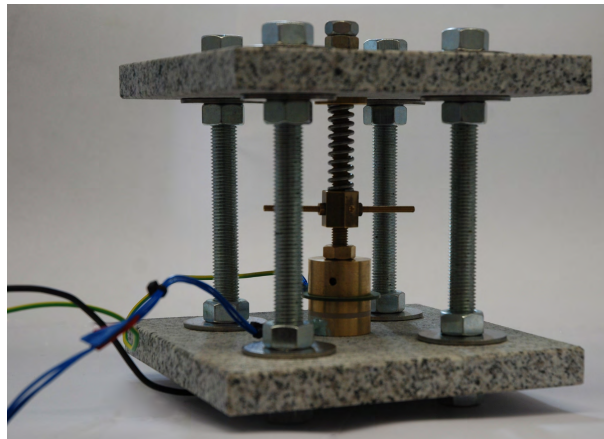


Abbildung 6.3.: Beispiel der verwendeten Messanordnung Typ2 für mikrovaristor-gefüllte Silikonplatten.

empfiehlt diese Anordnung auch für die Messung von Oberflächenleitfähigkeiten, die dann zwischen der Messelektrode und dem Ring gemessen werden. Die dritte Elektrode wird als Gegenelektrode geerdet. Aufgrund der hohen Nichtlinearität der mikrovaristorgefüllten Polymere wirkt die Schirmung durch die Gegenelektrode nicht und eine normkonforme Messung ist nicht möglich. Erschwerend wirkt sich die ringförmige Messfläche bei einem nichtlinearen Material aus. In Abschnitt 6.3.1 wird diese Problematik an Hand der schlauchförmigen Prüflinge vertieft.

### 6.2.3. Gleichspannungscharakteristik

Die Charakterisierung einer (nicht-)linearen Leitfähigkeit ist bei Gleichspannung prinzipiell einfach mit dem in Abbildung B.1 gezeigten Messkreis umzusetzen. Dabei wird die Spannung und die konstante (definierte) Messzeit geregelt. Das heißt, sowohl der Beginn der Messung nach Erreichen der Spannungsstufe als auch der eigentliche Messzeitraum müssen konstant gehalten werden. Zudem werden die Kennlinien mehrmals aufgenommen, da das Material bei der ersten Messung polarisiert wird. Dieser Vorgang ist bei einer zweiten Messung abgeschlossen, so dass reproduzierbar gemessen werden kann. Durch einen Wechsel der Polarität ist diese Polarisierung reversibel. Bei einer Stromregelung bei der Kennlinienbestimmung scheint dieser Effekt nicht aufzutreten. Die Anpresskraft zur Kontaktierung der Proben ist wie zuvor beschrieben definiert. Ein Beispiel für drei mikrovaristorgefüllte Silikone ist in **Abbildung 6.4** gegeben. Bei einer Stromdichte  $J_{DC} = 1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  werden Schaltpunkte von  $E_b = 500 \text{ V/mm}$ ,  $700 \text{ V/mm}$  und  $1000 \text{ V/mm}$  gemessen. Das Durchschalten des Materials findet generell bei einer ähnlichen Feldstärke statt. Zur Darstellung der nichtlinearen Kennlinie wird eine in der Varistortechnik übliche, halblogarithmische Darstellung gewählt, die den Strom logarithmisch auf der Abszisse und die Spannung linear auf der Ordinate zeigt. So können die weiten Strombereiche dargestellt werden. Die unterschiedlichen mikrovaristorgefüllten Silikone werden in dieser Arbeit nach Hersteller und Schaltpunkt unterschieden. Eine vollständige Übersicht gibt **Tabelle 6.2**.

Tabelle 6.2.: Übersicht der untersuchten mikrovaristorgefüllten Silikone. Dargestellt sind relative Permittivität, der Schaltpunkt  $E_b$  und eine evtl. Silanisierung. Die Buchstaben indizieren unterschiedliche Hersteller.

Silikontyp	D-4000	A-1200	B-1000	C-1000	D-700	B-500	C-500
Silanisierung	n	n	n	j	j	n	j
$E_b$ in V/mm	4000	1200	1200	1200	700	500	500

Aus den Gleichspannungskennlinien kann nach Gleichung 2.14 der Nichtlinearitätsexponent  $\alpha$  bestimmt werden, der exemplarisch für die drei gefüllten Silikone

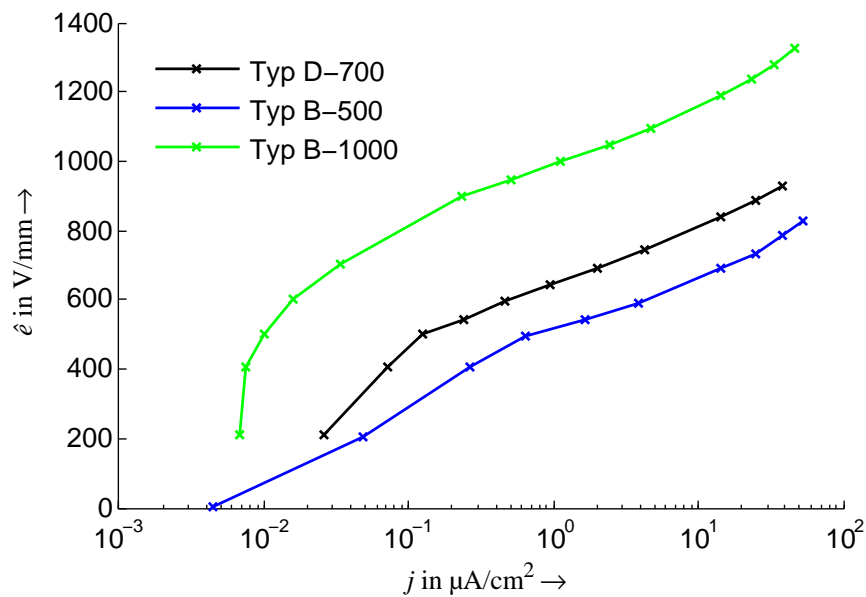


Abbildung 6.4.: Gleichspannungscharakteristik und resistiver Stromanteil bei Wechselspannung von plattenförmigen Prüflingen des Types B-500, D-700 und B-1000

in Abhängigkeit der anliegenden Feldstärke in **Abbildung 6.5** wiedergegeben ist. Es zeigt sich, dass er im Bereich des Schaltpunktes  $E_b$  maximal ist, so dass er für dessen ergänzende Definition verwendet werden kann. Der Nichtlinearitätsexponent

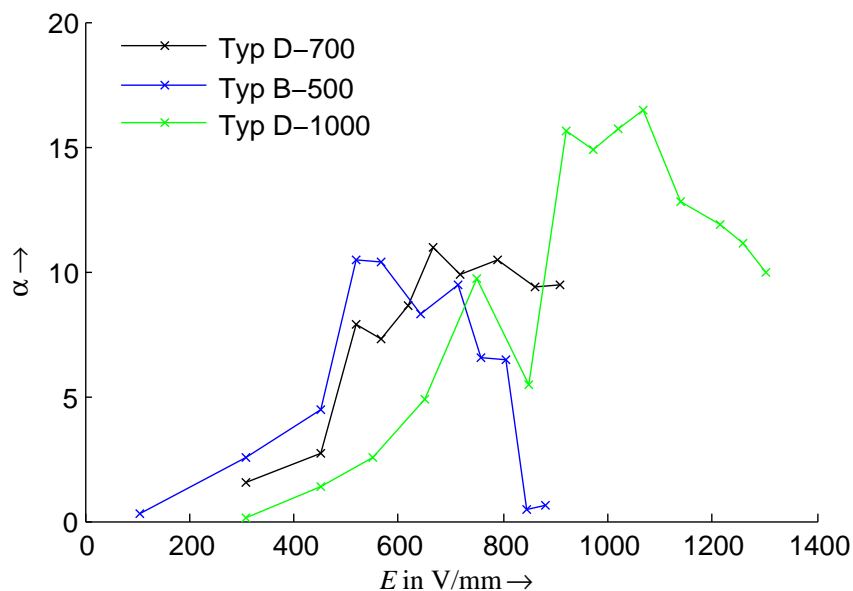


Abbildung 6.5.: Beispiel der Abhängigkeit des Nichtlinearitätsexponenten  $\alpha$  dreier Silikone von der elektrischen Feldstärke

ist nicht nur stark von der anliegenden elektrischen Feldstärke abhängig, sondern

steigt auch mit dem Schaltpunkt  $E_b$  selbst. Auffällig ist aber, dass die Silanisierung des Materials D-700 keinen Einfluss auf den Nichtlinearitätsexponenten hat. Davon unabhängig nimmt er bei großen Aussteuerungen wieder stark ab. Dies hängt mit der Erwärmung der Prüflinge zusammen, die aufgrund des PTC-Verhaltens des Widerstandes des mikrovaristorgefüllten Silikons zu einem Abknicken der Kennlinie führt, das in Abbildung 6.4 zu erkennen ist. Im weiteren kann die nichtlineare Leitfähigkeit in Abhängigkeit der Feldstärke angegeben werden. **Abbildung 6.6** zeigt die zu Abbildung 6.5 gehörenden Kennlinien als Beispiel. Gerade in dieser Form kann

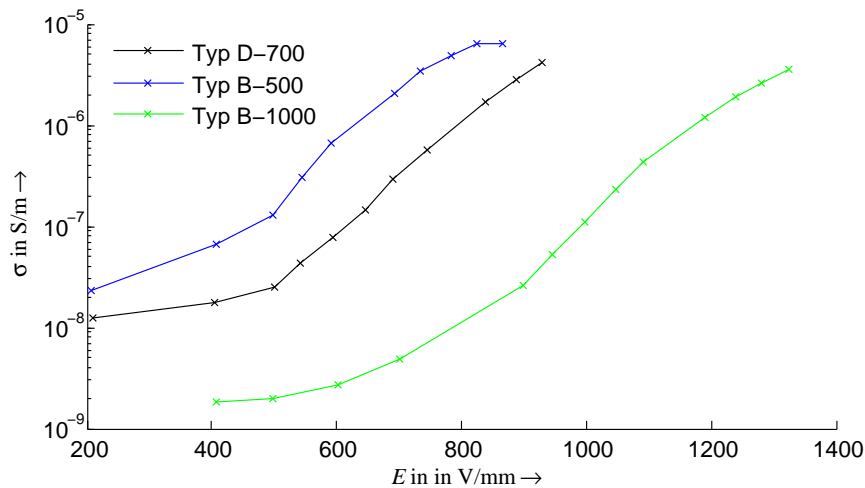


Abbildung 6.6.: Beispiel für die Abhängigkeit der Leitfähigkeit der drei untersuchten Silikone von der elektrischen Feldstärke

die Kennlinie als Basis für Simulationsrechnungen und Modellbildungen verwendet werden. Da sie aber aus einer  $J$ - $E$ -Kennlinie (siehe Abbildung 6.4) abgeleitet ist, bietet sie keinen zusätzlichen Nutzen, wenn Untersuchungen zur Charakterisierung durchgeführt werden.

### 6.2.4. Wechselspannungscharakteristik

Bei einer sinusförmigen Wechselspannung setzt sich der Strom durch einen mikrovaristorgefüllten Prüfling aus einem resistiven  $i_{\text{res}}(t)$  und einem kapazitiven  $i_{\text{kap}}(t)$  Strom zusammen (siehe Parallelersatzschaltbild in Abbildung 3.9). Für Feldsteuermaterialien ist die zusätzliche Angabe der Feldgrößen von Interesse:

$$i(t) = i(t)_{\text{res}} + i(t)_{\text{kap}} \quad (6.1)$$

$$\vec{J}(t) = \vec{J}_{\text{res}}(t) + \vec{J}_{\text{kap}}(t) \quad (6.2)$$

$$\vec{J}(t) = \kappa \vec{E}(t) + \varepsilon \frac{d}{dt}(\vec{E}(t)) \quad (6.3)$$

Dieses Modell hat sich als ausreichend erwiesen, um mikrovaristorgefüllte Polymere hinsichtlich ihres elektrischen, thermischen und mechanischen Verhaltens charakterisieren zu können. Die Permittivität wurde für die Untersuchungen in dieser Arbeit gezielt als feldunabhängig gewählt. In der Literatur werden zudem auch Modelle diskutiert, die neben der nichtlinearen Leitfähigkeit auch eine nichtlineare feldabhängige Permittivität einführen (siehe [Bla15]). Dieses Modell liefert eine bessere Beschreibung der im Polymer eingebetteten Mikrovaristoren. Allerdings wird gleichzeitig das Modell zu aufwendig für die zu untersuchenden Geometrien. Dies gilt vor allem, da sie für die Eigenkapazität der Verbundisolatoren und des Endenglimmschutz jeweils nur eine untergeordnete Rolle spielen. Dagegen ist beim FSE klar der Übergang von kapazitiver zu resistiver Steuerung zu erkennen. Diese kann daher getrennt beschrieben werden. Auf Basis des Parallelersatzschaltbildes wird die Messung phasenaufgelöst mit dem Messkreis nach Abbildung B.2 durchgeführt. Neben den Scheitelwerten  $\hat{i}(\hat{u})$  wird daher die kapazitive Komponente  $i_{\text{kap}}(u(t) = 0)$  und die resistive Komponente  $i_{\text{res}}(u(t) = \hat{u})$  angegeben. **Abbildung 6.7** zeigt typische bei Wechselspannung aufgenommene Diagramme. Das obere ist typisch für den *Vordurchbruch-Bereich* der Kennlinie, das untere für den Beginn des *Durchbruch-Bereichs*. Letzteres Oszillogramm zeigt, wie stark oberwellenbehaftet der Strom ist. Aufgrund dessen ist eine reine Angabe eines Effektivwertes nicht sinnvoll. Im Weiteren soll anhand der Oszillogramme die Messung und die Auswertung der Wechselspannungscharakteristik erläutert werden. Die Aufnahme der Wechselspannungskennlinie der mikrovaristorgefüllten Prüflinge erfolgt spannungsgeregelt bei einem möglichst oberwellenfreien Sinus ( $f = 50 \text{ Hz}$ ). Während der Messung bei einer Spannungsstufe werden  $n_p$  Perioden mit  $f_{\text{abtast}} = 100 \text{ kHz}$  abgetastet, um den nichtlinearen Strom aufnehmen zu können. Die Aufzeichnung mehrerer Perioden ermöglicht während der Auswertung durch Matlab eine Mittelwertbildung. Die Auswertung der Scheitelwerte  $\hat{u}$ ,  $\hat{i}$  und  $\hat{u}'$  erfolgt durch Definition eines Messbandes mit einer Berücksichtigung von Werten, die  $\pm 2,5 \%$  abweichen. Der zeitliche Mittelpunkt dieses Tupels der  $\hat{u}_{\text{max}}$ -Werte definiert den Zeitpunkt des resistiven Stromes. Da dieser zunächst als Teil eines überwiegend kapazitiven Stromes bestimmt werden muss, werden von diesem Punkt ausgehend die vorangegangenen und folgenden Stromwerte für eine Mittelwertbildung berücksichtigt, so dass die resistive Komponente reproduzierbar aufgenommen werden kann. Um gleichzeitig im ausgesteuerten Bereich der Kennlinie, in dem der resistive Teil im Wesentlichen dem Scheitelwert entspricht, zuverlässig messen zu können, werden  $n = 21$  Werte herangezogen. Der kapazitive Stromanteil ist dementsprechend schwerer im leitfähi-

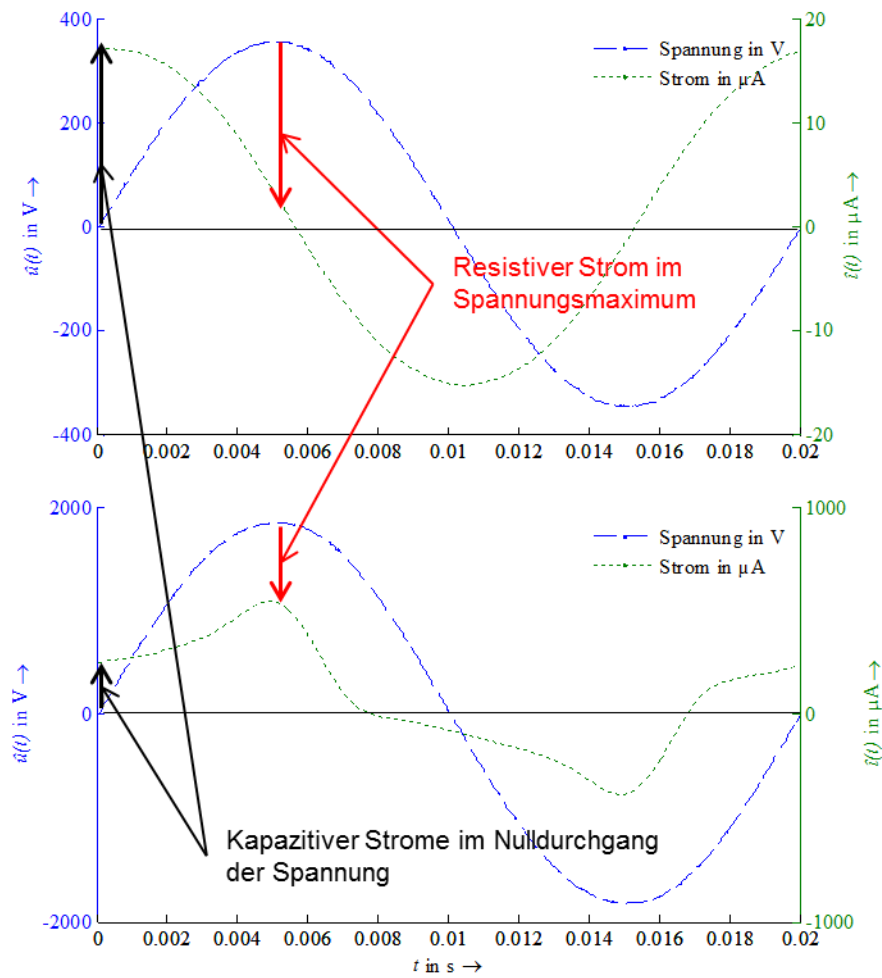


Abbildung 6.7.: Erläuterung der Auswertung der Wechsellspannungskennlinie an zwei typischen Verläufen von Strom und Spannung unterschiedlicher Aussteuerung. Oben: Kapazitiver Kennlinienbereich. Unten: Resistiver Kennlinienbereich

gen Bereich zu bestimmen. Deshalb wird der gleiche Algorithmus auf die Ableitung der Spannung  $\hat{u}'(t)$  angewendet. Aus dieser lässt sich dann zusätzlich die Kapazität und die relative Permittivität des Prüflings bestimmen:

$$C_0 = \varepsilon_0 \cdot \frac{A_{\text{Mess}}}{d_{\text{Prüfling}}} \quad (6.4)$$

$$C_x = \frac{\hat{i}}{\omega \cdot \hat{u}} \quad (6.5)$$

$$\varepsilon_r = \frac{C_x}{C_0} \quad (6.6)$$



Zudem kann aus dem zeitlichen Verlauf der Ableitung eine feld- und zeitabhängige Permittivität ermittelt werden:

$$C_x = \frac{i(t)}{u'(t)} \quad (6.7)$$

Die Bestimmung aus der Ableitung heraus ist natürlich nicht stetig im Spannungsmaximum und damit nur eingeschränkt nutzbar. Der beschriebene Algorithmus dient als Basis der Kennlinienbestimmung und kann auch auf die negative Halbwelle angewendet werden. Eine Hysterese kann allerdings nicht beobachtet werden. Vielmehr ergibt sich aus der negativen Halbwelle eine symmetrische Kennlinie. Diese Symmetrie ist eine Grundlage für AC-Anwendungen.

### 6.2.5. Eigenschaften der Wechselspannungskennlinie

Die mikrovaristorgefüllten Polymere zeichnen sich zunächst durch eine hohe relative Permittivität aus. Sie ermöglicht die Verwendung als refraktive Feldsteuerung an Kabelgarnituren und wird deshalb an einigen Silikontypen untersucht. Bestimmt wird sie aus dem Scheitelwert des kapazitiven Stromes  $\hat{i}_{\text{kap}}$  (siehe Abschnitt 6.2.4). Die Ergebnisse sind in **Tabelle 6.3** zusammengefasst. Es zeigt sich, dass die relative Permittivität  $\epsilon_r$  abhängig vom Schaltpunkt  $E_b$  des Materials respektive von der Größe der Korngrenzen und der Partikelgröße der Mikrovaristoren ist, die mit abnehmendem  $E_b$  zunimmt. Diese Zunahme von Korn- und Partikelgröße kann auch die Ursache dafür sein, dass der Leckstrom mit kleiner werdendem  $E_b$  zunimmt, da geometrisch betrachtet weniger und größere Kontakte zur Verfügung stehen. Dieser Effekt wird an **Abbildung 6.8** erläutert.

Tabelle 6.3.: Relative Permittivität in Abhängigkeit des Schaltpunktes  $E_b$  des mikrovaristorgefüllten Silikons

Silikontyp	D-4000	A-1000	B-1000	C-1000	D-700	B-500	C-500
Silanisierung	n	n	n	j	j	n	j
$E_b$ in V/mm	4000	1200	1200	1200	700	500	500
$\epsilon_r$	$\approx 8$	$\approx 12$	$\approx 11$	$\approx 10$	$\approx 18$	15 – 20	$\approx 15$

Der Graph zeigt eine vollständige Wechselspannungskennlinie eines mikrovaristorgefüllten Silikonprüflings. Wie beschrieben ist der Scheitelwert des Stromes  $\hat{i}_{\text{peak}}$  neben dem resistiven  $\hat{i}_{\text{res}}$  und dem kapazitiven Strom  $\hat{i}_{\text{kap}}$  wiedergegeben. Deutlich ist zu erkennen, wie sich das Material zunächst rein kapazitiv verhält. Der resistive Strom spielt in diesem Bereich der Kennlinie eine untergeordnete Reihe, da er in etwa eine Größenordnung geringer ist. Erst im oberen Bereich wird die Wech-

selspannungskennlinie durch den nichtlinearen Widerstand der Mikrovaristoren bestimmt.

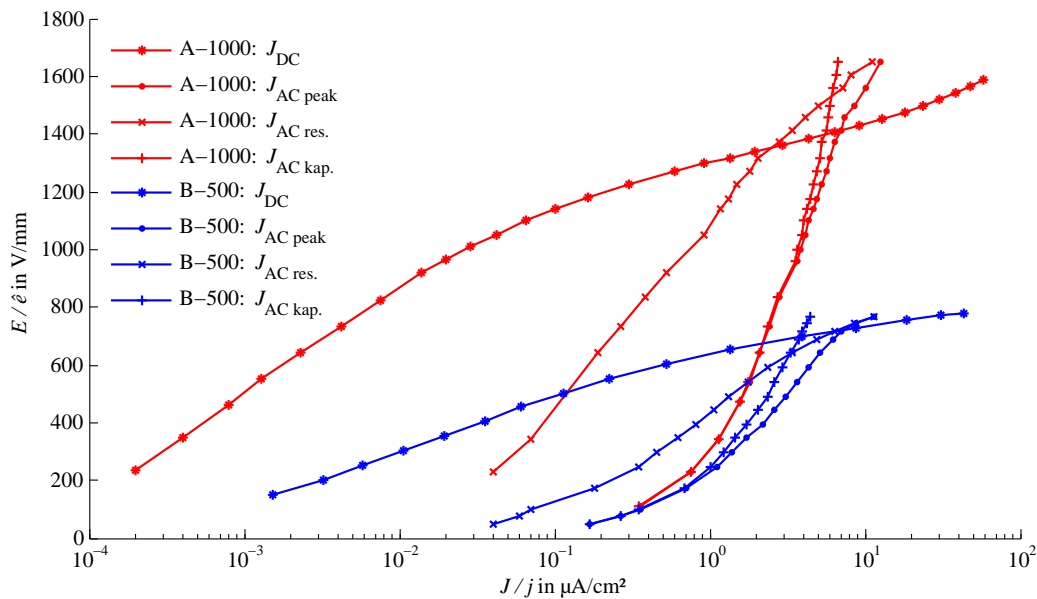


Abbildung 6.8.: Vergleich zweier Kennlinien bei Wechsel- und Gleichspannung. Die Definition des Schaltpunktes bei Gleichspannung erfolgt bei  $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$

### 6.2.6. Unterschiede der Kennlinien bei Gleich- und Wechselspannung

Abschließend sollen die Unterschiede von Wechsel- und Gleichspannungskennlinie anhand von Abbildung 6.8 aufgezeigt werden. Diese sind vor allem im Leckstrombereich sehr deutlich, da sie im Bereich von ein bis zwei Größenordnungen liegen. Die Ursache liegt zum einen in dem ZnO selbst begründet, da in diesem Bereich der Strom im Wesentlichen kapazitiv ist [Don11]. Dieser Effekt wird bei den mikrovaristorgefüllten Polymeren noch verstärkt, da aufgrund des Verschiebungsstromes im Vergleich zu einer Aussteuerung bei Gleichspannung mehr Ketten leitfähig werden. Im Durchbruchbereich bestimmt dann der Ladungsträgerfluss die Kennlinie, weswegen sich die Kennlinien kreuzen und die gefüllten Polymere bei einer etwas höheren Feldstärke durchschalten. Auffällig am Leckstrom ist zudem, dass dieser mit abnehmendem Schaltpunkt  $E_b$  größer wird. Die Ursache ist nicht ausschließlich die nichtlineare Kennlinie, sondern auch die Partikelgröße, die die effektiv vorhandene Anzahl der Partikel-Partikel-Kontakte bestimmt. An jeder dieser Kontaktstellen fällt ein  $\delta U$  ab, das sich in Summe der eigentlichen Mikrovaristorkennlinie überlagert und deren Nichtlinearität reduziert [Gre04]. Daraus ergibt sich ein mögliches unteres Limit der einsetzbaren Schaltpunkte, da sonst die umgesetzten Verluste während

des Betriebes des Gerätes zu groß werden. Dies muss besonders bei Kabelgarnituren und in Endenglimmschutzsystemen berücksichtigt werden.

Aufgrund der Unterschiede zwischen Wechsel- und Gleichspannungscharakteristik ist es nicht sinnvoll, für die Anwendungen jeweils charakterisierende Messungen nur bei Gleichspannung durchzuführen. Insbesondere dürfen die Gleichspannungsdaten nicht als Basis für Simulationsrechnungen unter Wechselspannung verwendet werden. Die ermittelten Wechselspannungskennlinien bieten dagegen eine gute Basis für Simulationen, um vor allem die Anwendung global berechnen zu können. Zu berücksichtigen ist allerdings, dass das verwendete Ersatzschaltbild nach Abbildung 3.9 das tatsächliche Verhalten deutlich vereinfacht.

## 6.3. Materialeigenschaften mikrovaristorgefüllter Silikone

### 6.3.1. Charakterisierung und mechanische Dehnung mikrovaristorgefüllter Feldsteuerelemente

In Mittelspannungsgarnituren werden die resistiv oder refraktiv steuernden Elemente als einfache Schläuche ausgeführt. Die Montagetechnik, z.B. als Aufschiebegarnituren oder Schrumpfelemente, hat darauf keinen Einfluss. In dieser Arbeit werden nur Aufschiebeendverschlüsse (siehe Kapitel 9) untersucht. Dementsprechend soll kurz die Charakterisierung der verwendeten Feldsteuerelemente beschrieben werden. Da sich die stark nichtlinearen Materialien in ihrem Verhalten grundsätzlich von bekannten Materialien unterscheiden, wird der Einfluss der Dehnung auf die nichtlineare Charakteristik untersucht. Die Dehnung selbst hat eine große praktische Bedeutung, da die Garnituren selbst einen weiten Bereich von Kabelquerschnitten abdecken sollen und eine gewisse Anpresskraft gewährleisten muss. So muss nicht nur ein kraftschlüssiger Kontakt zur äußeren Leitschicht, sondern auch entlang der kompletten Isolation hergestellt werden. Als Ausgangsbasis für die Überlegungen ist die generelle Abhängigkeit des elektrischen Feldes in einem zylinderförmigen Schlauch vom Radius in Gleichung 6.8 angegeben.

$$E(r) = \frac{U}{r \cdot \ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right)} \quad (6.8)$$

Die Stromdichte ist nun nicht nur geometrisch vom Radius  $r$  abhängig, sondern aufgrund der nichtlinearen Leitfähigkeit  $\sigma = f(E)$  auch vom anliegenden elektrischen Feld. Dementsprechend groß ist der Einfluss des Radius des Feldsteuerschlauches. Die Untersuchungen selbst erfolgen mit unterschiedlichen Dehnungsbelastungen, die durch eine Variation des Elektrodendurchmessers realisiert werden. Im Betrieb sind die Aufschiebegarnituren aus Silikon in Bereichen von  $\varepsilon_{\text{mech}} = 10 - 50 \%$  ge-

dehnt. Die resultierenden radialen Dehnungen stellen eine mechanische Belastung des Silikons dar.

Im Folgenden wird der Einfluss einer solchen Belastung auf das hoch gefüllte Silikon des Typs A-1200 beschrieben. Wichtig sind diese Ergebnisse für die Untersuchung in Kapitel 9. Verwendet werden gefüllte Silikonschläuche, deren Eigenschaften in **Tabelle 6.4** zusammengefasst sind. Hergestellt werden diese Silikonschläuche

Tabelle 6.4.: Eigenschaften der untersuchten Silikonschläuche

$d_i$ in mm	$D_a$ in mm	$l_{\text{Mess}}$ in mm
22	28	40

ebenfalls aus HTV-Silikon im fachgebietseigenen Gießlabor in der, in Abbildung A.2 gezeigten Pressform. Die Prüflinge werden, wie die Silikonplatten, bei einer Temperatur  $T = 175^\circ\text{C}$  vernetzt und bei  $T = 200^\circ\text{C}$  für  $t = 1\text{ h}$  getempert. Die Messung der Kennlinie erfolgt allerdings nun in radialer Richtung. Die Untersuchungen erfolgen, gemittelt aus fünf Prüflingen (nach Abbildung B.6), bei Wechsel- und Gleichspannung jeweils mit  $\varepsilon_{\text{mech}} = 5\%$ ,  $30\%$  und  $60\%$  Dehnung. Aus diesen Dehnungsstufen ergeben sich die in **Tabelle 6.5** wiedergegebenen Anordnungen. Die Dehnungsstufe  $\varepsilon = 5\%$  stellt die Ausgangsdehnung dar. Aus diesen Geometri-

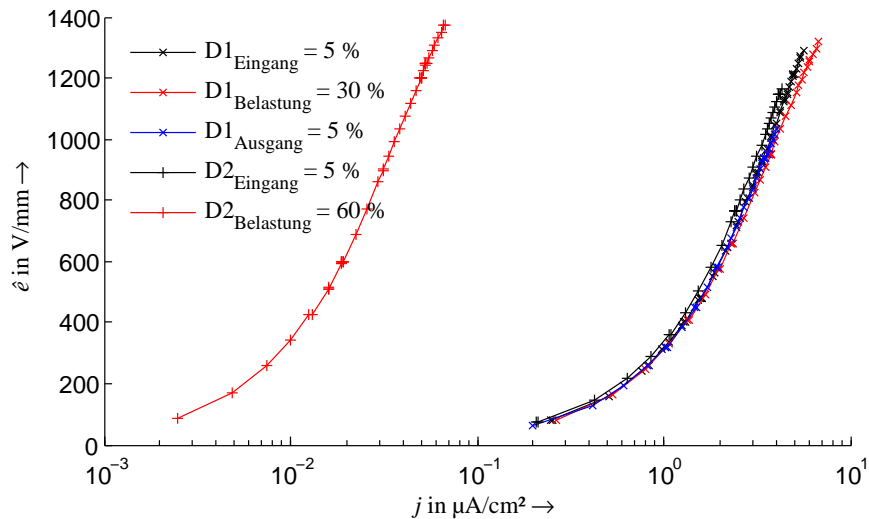
Tabelle 6.5.: Geometrische Details der einzelnen Dehnungsstufen

$\varepsilon_{\text{mech}}$	$r_i$	$r_a$	$d_{\text{Schlauch}}$
5 %	11,50 mm	14,28 mm	2,78 mm
30 %	14,30 mm	16,85 mm	2,55 mm
60 %	17,63 mm	19,90 mm	2,28 mm

en ergeben sich dann unterschiedliche Faktoren zur Berechnung des elektrischen Feldes, deren geometrische Ableitung zwar trivial ist, aber die trotzdem bei einem Material mit einer nichtlinearen Kennlinie berücksichtigt werden müssen. Dementsprechend groß ist der Unterschied der  $E$ - $J$ -Kennlinien, je nachdem auf welchen Radius diese bezogen werden. Diese Unterschiede sind in **Tabelle 6.6** dargestellt. Der Faktor  $k_1$  spiegelt die mit zunehmender Dehnung dünner werdenden Feldsteuerelemente wider, da er auf einen mittleren Radius  $r_{\text{av}} = 0,5 \cdot (r_i + r_a)$  bezogen ist. Dementsprechend wird er zur Bestimmung des elektrischen Feldes in den folgenden Untersuchungen verwendet. Zu beachten sind nun die bezogenen Unterschiede, die sich aufgrund der radialen Abhängigkeit ergeben. Diese haben einen sehr großen Einfluss aufgrund der nichtlinearen Kennlinie. Zum Beispiel ist bei der Dehnungsstufe  $\varepsilon_{\text{mech}} = 5\%$  die Feldstärke am inneren Radius ca. 20 % höher als an der äußeren

Tabelle 6.6.: Faktoren der einzelnen Dehnungsstufen

$\varepsilon_{\text{mech}}$	$r_{\text{av}} \cdot \ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right)$	$k_1 = \frac{1}{r_i \cdot \ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right)}$	$k_2 = \frac{1}{r_{\text{av}} \cdot \ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right)}$	$k_3 = \frac{1}{r_a \cdot \ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right)}$	$\frac{k_1 - k_2}{k_1}$	$\frac{k_1 - k_3}{k_1}$
5 %	2,79 mm	0,40/mm	0,36/mm	0,32/mm	10,8 %	19,4 %
30 %	2,56 mm	0,43/mm	0,39/mm	0,36/mm	8,2 %	15,1 %
60 %	2,28 mm	0,47/mm	0,44/mm	0,41/mm	6,1 %	11,4 %


Abbildung 6.9.: Dehnungsabhängigkeit der  $\hat{\varepsilon}$ - $\hat{j}$ -Kennlinie an mikrovaristorgefüllten Schläuchen vom Typ A-1200 bei Wechselspannung

Elektrode. Dementsprechend wird das Material jeweils nur am inneren Radius leitfähig ausgesteuert, während der äußere Bereich isolierend bleibt. Die Untersuchungen selbst werden in allen drei Stufen ebenfalls mit einer Schutzringanordnung nach Abbildung B.6 durchgeführt. Wie bei der Untersuchung von plattenförmigen Prüflingen ist bei der Anordnung nur bei der Bestimmung der Volumeneigenschaften die Schirmung wirkungsvoll.

**Abbildung 6.9** zeigt nun die Ergebnisse als Scheitelwerte der  $\hat{\varepsilon}$ - $\hat{j}$ -Kennlinie bei Wechselspannung. Es zeigt sich, dass bei Wechselspannung die geringere Dehnung ( $\varepsilon_{\text{mech}} = 30\%$ ) keinen Einfluss auf die Kennlinie hat. Erst eine Dehnung  $\varepsilon = 60\%$  führt zu einer stark reduzierten Leitfähigkeit. Da der Strom hier aber im Wesentlichen kapazitiv ist, bedeutet das eine Reduktion der relativen Permittivität des Materials. Diese lässt sich aber nur dadurch erklären, dass Mikrovaristoren aus der Matrix gerissen werden und somit die Übergangsimpedanz zwischen den einzelnen Partikeln zunimmt. In den beiden Messungen der Eingangskennlinie bestätigt sich, dass es bei den Wechselspannungsversuchen zu einer Überlastung kam, da der Widerstand bei den zuvor mit  $\varepsilon_{\text{mech}} = 60\%$  belasteten Prüflingen höher ist. Die

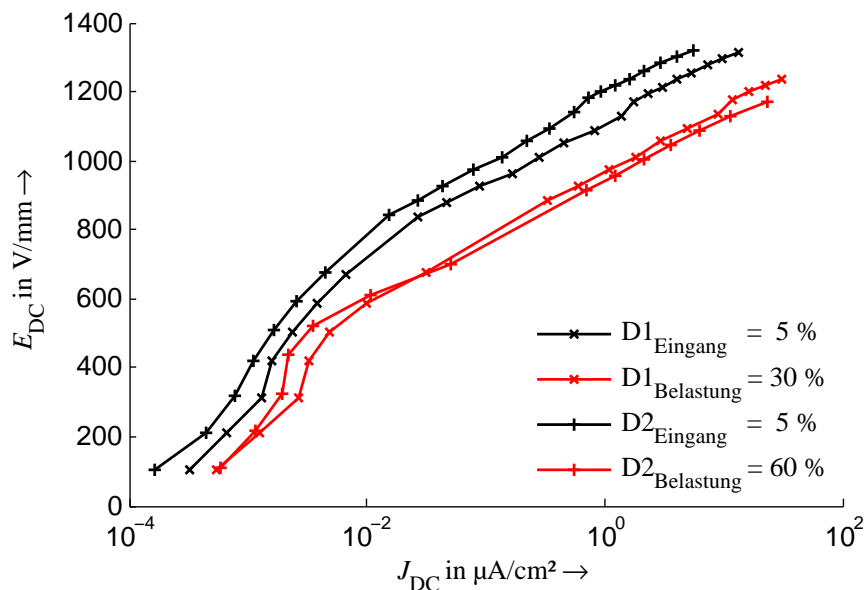


Abbildung 6.10.: Mechanische Dehnung von mikrovaristorgefüllten Schläuchen vom Typ A-1200 bei Gleichspannung

Leitfähigkeiten bei Gleichspannung nehmen dagegen in beiden Fällen mit der Dehnung zu. Dies steht nicht in einem generellen Widerspruch zu den vorangegangenen Ergebnissen, da die absoluten Werte geringer sind als im Fall der Wechsellspannung. Das heißt, die Anzahl der vorhandenen leitfähigen Pfade wird durch die Dehnung und die damit verringerte Schichtdicke erhöht.

### 6.3.2. Temperaturabhängigkeit der $E$ - $J$ -Kennlinie mikrovaristorgefüllter Silikone

Zunächst soll die Abhängigkeit der Gleichspannungskennlinie von der Umgebungstemperatur untersucht werden. Diese Untersuchungen werden am Material A-1200 durchgeführt. Verwendet wird der Aufbau nach Abschnitt 6.2. Die Ergebnisse für  $T = 20\text{--}90^\circ\text{C}$  sind in **Abbildung 6.11** und **Abbildung C.2** dargestellt. Es zeigt sich, dass der Widerstand des mikrovaristorgefüllten Silikons mit der Temperatur steigt. Dieses PTC-Verhalten des nichtlinearen elektrischen Widerstandes steht sowohl im Gegensatz zum später beschriebenen Verhalten der gefüllten Phenolharzlacke (siehe Abschnitt 6.5) als auch dem eines Energievaristors (siehe z.B. [Was94]). Dieser Widerspruch liegt in der gleichzeitigen thermischen Ausdehnung des Silikons begründet. In Abschnitt 3.2.3.4 werden diese thermischen Eigenschaften wie sie ebenfalls in [Don11] beschrieben sind, zusammengefasst.

Darauf basierend sollen weitere Untersuchungen der Temperaturabhängigkeit bei Wechsellspannung durchgeführt werden. Die Darstellung erfolgt als  $\hat{e}_{AC}$ - $\hat{j}_{AC}$ -

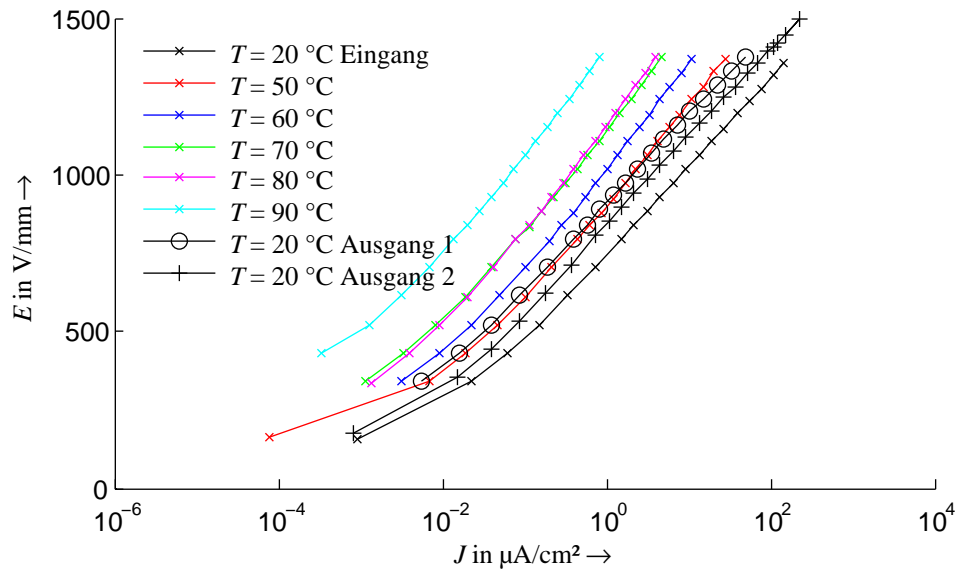


Abbildung 6.11.: Temperaturabhängigkeit der  $E$ - $J$ -Kennlinie, aufgenommen bei Gleichspannung an einem mikrovaristorgefüllten Prüfling vom Typ A-1200.

Kennlinie. Um den weiteren Einfluss der Siliconmatrix zu untersuchen, werden die unbehandelten Mikrovaristoren der Typen A-1200 (siehe **Abbildung 6.12**), C-500 und C-1000 (siehe **Abbildung 6.13**) mit den silaniserten Typen B-500 und B-1000 (siehe **Abbildung 6.14**) bei den Temperaturen  $T = 30\text{ °C}$  und  $120\text{ °C}$  verglichen.

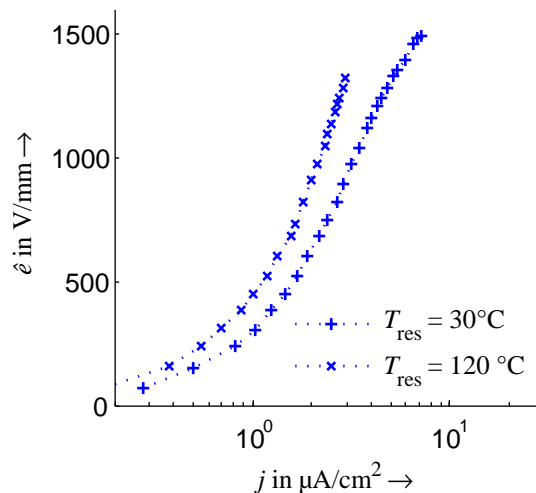


Abbildung 6.12.: Temperaturabhängige Wechselspannungskennlinie einer Siliconplatte des Typs A-1200 bei Wechselspannung

Generell bestätigt sich bei allen Messungen das PTC-Verhalten des Widerstandes. Die Ergebnisse zeigen außerdem, dass sich die Temperaturabhängigkeit bei den

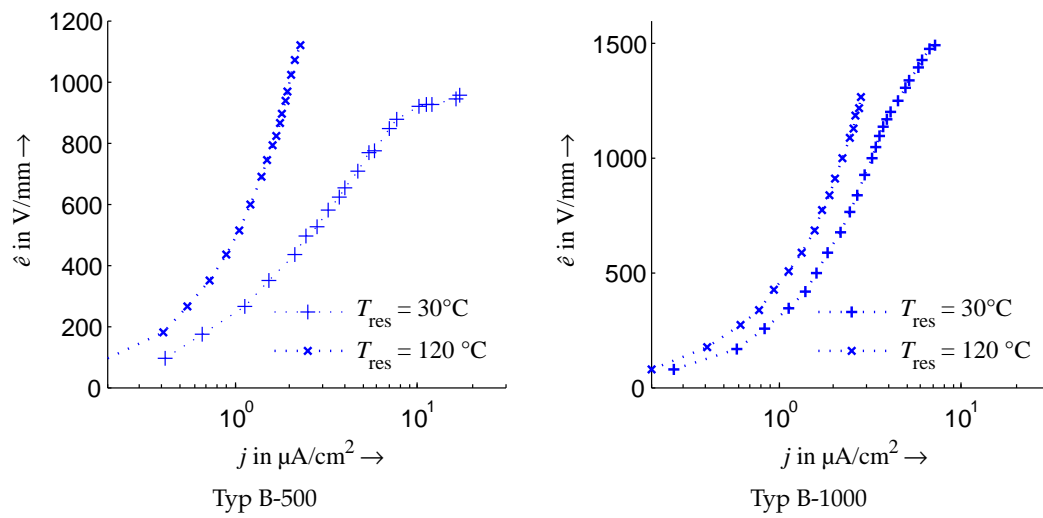


Abbildung 6.13.: Temperaturabhängige Wecheslspannungskennlinie von Silikonplatten der Typen B-500 und B-1000 bei Wecheslspannung

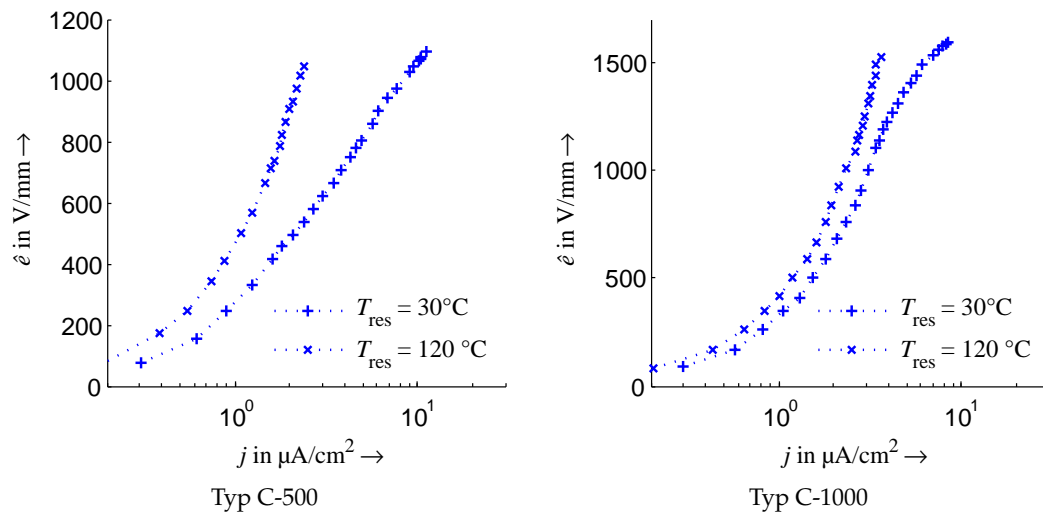


Abbildung 6.14.: Temperaturabhängige Wecheslspannungskennlinie von Silikonplatten der Typen C-500 und C-1000 bei Wecheslspannung



Varianten mit silanisierten Mikrovaristoren geringfügig verringert, da das Elastomer mechanisch stabiler wird. Dieses Ergebnis ist ein Indiz, dass die Einbettung der Mikrovaristoren besonders berücksichtigt werden muss. Außerdem kann festgestellt werden, dass die Temperaturabhängigkeit bei dem geringeren Schaltpunkt höher ist.

Eine abschließende Betrachtung soll mit einem Mikrovaristorpulver erfolgen, das mit Hilfe eines Silikonöls nach Abschnitt 6.1 bei Wechselspannung vermessen wird. Es werden die Temperaturen  $T = 30\text{ °C}$ ,  $80\text{ °C}$  und  $100\text{ °C}$  verwendet. In diesem Fall werden die  $\hat{u}$ - $\hat{i}$ -Kennlinien in **Abbildung 6.15** verglichen. Es ist mit zunehmender

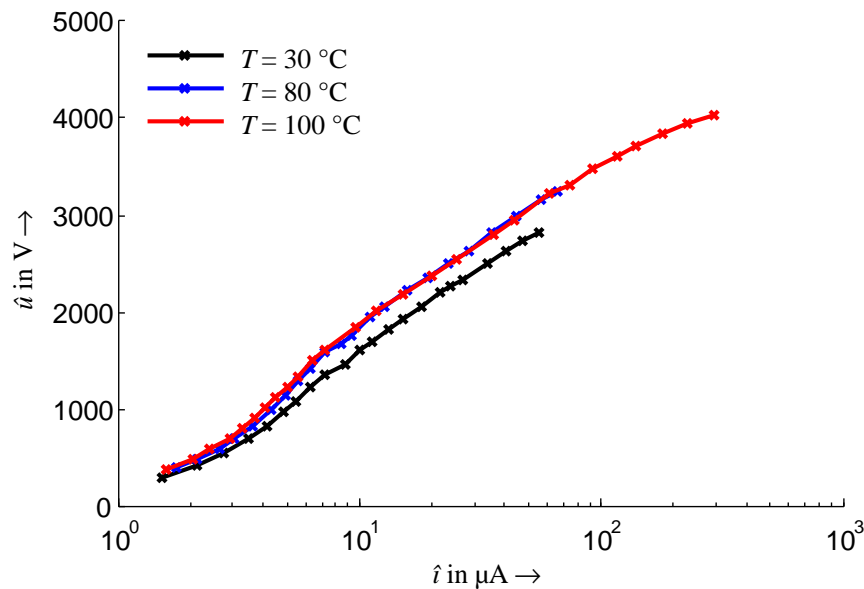


Abbildung 6.15.: Wechselspannungskennlinie des Mikrovaristorpulver Typ 1 in Abhängigkeit der Temperatur.

Temperatur wiederum ein Ansteigen des Widerstandes zu erkennen, der aber im Vergleich zum Verhalten der gefüllten Silikone in Abbildung 6.11 nicht so ausgeprägt über Dekaden auftritt. So ist in diesem Fall ebenfalls denkbar, dass sich das Silikonöl bei erhöhter Temperatur ebenfalls ausdehnt und so den Übergangswiderstand zwischen den einzelnen Mikrovaristoren erhöht.

Welche Folge diese Temperaturabhängigkeit auf die jeweilige Anwendung hat, kann an dieser Stelle nicht gesagt werden. Es ist aber klar, dass sie auch durch die jeweils verwendete Matrix bestimmt wird.

### 6.3.3. Kriechstromfestigkeit mikrovaristorgefüllter Silikone

Der Schiefe-Ebene-Test (engl. Inclined-Plane-Test) (IPT) nach [IEC 60587] ermöglicht die Beurteilung der Kriechstrom- und Erosionsfestigkeit von polymeren Isolier-

Tabelle 6.7.: Erosionsrate der Prüflinge vom Typ A-1200

$U_P$ in kV	2,5	3,5	4,5
$r_{\text{Erosion}}$ in %/h Typ A-1000	0,6	0,72	0,23
$r_{\text{Erosion}}$ in mg/min Typ B-500	1,7	21,2	-

werkstoffen. Er ist obligatorisch für Materialien, die als Freiluftisolation eingesetzt werden sollen. Bei der Evaluation der mikrovaristorgefüllten Silikone bietet der Test die Möglichkeit, zu untersuchen, ob das Material Oberflächenentladungen auf einer Isolatoroberfläche widerstehen kann und ob sogar die Möglichkeit besteht, dass diese unterdrückt werden können. Das Verhalten wird in Abhängigkeit des Schaltpunktes mit den mikrovaristorgefüllten Silikonen vom Typ A-1200 und B-500 untersucht. Ein Beispiel einer Probe ist in Abbildung A.4 zu sehen, von denen jeweils fünf parallel geprüft werden. Als Vorbereitung werden sie gereinigt, aber nicht zusätzlich angeschliffen. Es wird das Verfahren 1 nach [IEC 60587] verwendet, das das Anlegen einer konstanten Prüfspannung  $U_P$  für eine Prüfdauer  $t_{\text{Prüf}} = 6 \text{ h}$  vorschreibt. Der Aufbau ist exemplarisch für einen Prüfling in Abbildung B.4 gezeigt. Der Elektrolyt läuft an der Unterseite herunter, wo auch Entladungen auftreten. Diese sind dann kritisch für den Prüfling, wenn sie stationär an der gleichen Stelle brennen können. Wird an einem Prüfling ein Strom von  $\hat{i} = 6 \text{ mA}$  (Merkmal A) gemessen, wird der Versuch abgebrochen. Anschließend erfolgt die Beurteilung der Erosion am Prüfling. Für das Silikon vom Typ A-1000 ergibt sich eine Klassifizierung von *Klasse 1 A2,5-3,5*<sup>13</sup>. Die Prüfung mit höheren Spannungen  $U_P = 3,5 \text{ kV}$  und  $4,5 \text{ kV}$  wird nicht bestanden. Die maximale Erosionsrate  $r_{\text{Erosion}} = \frac{\Delta m}{\Delta t}$  tritt bei  $U_P = 3,5 \text{ kV}$  auf **Tabelle 6.7**. Für das Silikon vom Typ B-500 ergibt sich eine Klassifizierung von *Klasse 1 A2,5-3,5*. Diese Klassen reichen für einen Freilufteinsatz des mikrovaristorgefüllten Silikons an Verbundisolatoren nicht aus.

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Schaltpunkte  $E_b = 500 \text{ V/mm}$  und  $1000 \text{ V/mm}$  des mikrovaristorgefüllten Silikons zu hoch sind, um Entladungen in einer solchen Prüfanordnung signifikant unterdrücken zu können. Die ist teilweise die Folge davon, dass in den Prüfungen nicht die real auftretenden Feldstärken geprüft werden können. Ob allerdings mit einem geringeren  $E_b$  alleine ein besseres Verhalten des reinen Materials erreicht werden kann, steht nicht fest. Im Weiteren muss untersucht werden, welchen Einfluss die Einbindung der Mikrovaristoren in das Silikon sowie der hohe Füllgrad haben.

---

<sup>13</sup>Bedeutung des Ergebnisses: Es wurde nach Verfahren 1, Merkmal A mit einer Spannung  $U_P = 2,5 \text{ kV}$  bei einer Erosionstiefe von  $3,5 \text{ mm}$  bestanden

## 6.4. Zerstörungsmechanismen mikrovaristorgefüllter Silikone

### 6.4.1. Betrachtungen zur Stromaufteilung der mikrovaristorgefüllten Platten

Die Mikrovaristoren bilden in der Silikonmatrix zusammenhängende Ketten, die durch das anliegende äußere elektrische Feld leitfähig werden. Dabei werden die einzelnen parallelen Ketten unterschiedlich stark angesteuert, so dass als Folge gewisse Unterschiede zwischen diesen auftreten. Exemplarisch werden jeweils fünf Messpunkte an zwei Plattenproben vom Typ A-1200 untersucht, um eine Aussage über die Homogenität und die damit verbundene unterschiedliche Aufteilung des Stroms zu erhalten. Die Ergebnisse sind in **Abbildung 6.16** und **Abbildung C.1** wiedergegeben. Es zeigt sich ein gewisser lokaler Unterschied zwischen den einzelnen

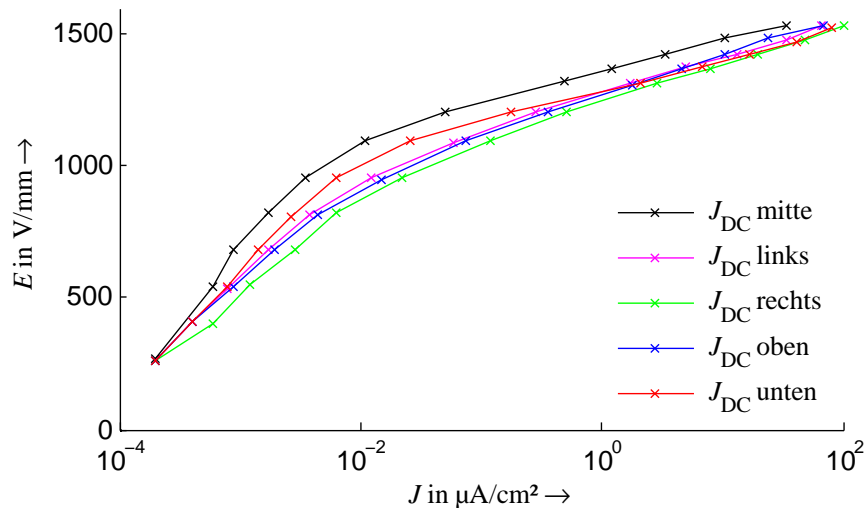


Abbildung 6.16.: Beispiel einer Messung zur Homogenität der Stromaufteilung bei Gleichspannung an einem Prüfling vom Typ A-1200.

Messpunkten, der eine räumliche Aufteilung der Strompfade durch den Silikonprüfling bestätigt. Dieser Aspekt muss bei den weiteren Untersuchungen berücksichtigt werden. Dies gilt für die Untersuchung des Durchschlagverhaltens gleichermaßen wie für die Modellbildung der einzelnen Anwendungen. Der Effekt selbst ist von Energievaristoren bekannt [Gre10], die mit zunehmender Feldstärke im Bereich des Schaltpunktes zunächst ebenfalls partiell leitfähig werden. Eine Verstärkung des Effektes folgt durch die Tatsache, dass die Mikrovaristoren in der Silikonmatrix eingebunden sind. Die Ergebnisse bestätigen zudem die Annahme, dass die Proben eine ausreichende Dimension brauchen, um für Simulationsrechnungen geeignete Kennlinien erstellen zu können.

#### 6.4.2. Untersuchung der Durchschlagspannung und der Leistungsaufnahme mikrovaristorgefüllter Silikone

Mikrovaristorgefüllte Silikone vereinigen die elektrischen Eigenschaften des dotierten ZnO mit den mechanischen des Polymers. Für die Beurteilung des Langzeitverhaltens ist entscheidend, wie sich der Verbundstoff bei zu hoher elektrischer Beanspruchung verhält. Die Prüfungen, die dies nachbilden, sind zerstörender Art, da sie die Grenzen des Verbundwerkstoffs zeigen sollen. Die Untersuchung der Durchschlagspannung und der umgesetzten Verlustleistung wird mit den Typen B-1000, C-1000 sowie B-500 und C-500 durchgeführt. So wird neben dem möglichen Einfluss des Schaltpunktes  $E_b$  auch die Silanisierung der Mikrovaristoren (Typen B) berücksichtigt. Pro Typ werden sechs Proben bei  $T = 30^\circ\text{C}$  geprüft, die jeweils aus zwei unterschiedlichen Platten stammen. Jede Spannungsstufe wird (in Anlehnung an [IEC 60243-1] Clause 9.4) für  $t = 1\text{ s}$ ,  $30\text{ s}$  und  $60\text{ s}$  angelegt. Die Eigenschaften der Prüfanordnung sind in Tabelle 6.1 und Abbildung 6.3 dargestellt. Die Untersuchungen erfolgen ausschließlich bei Wechselspannung. Die Ergebnisse sind in **Tabelle 6.8** zusammengefasst.

Der Schaltpunkt hat einen offenkundigen Einfluss auf die elektrische Festigkeit des gefüllten Polymers, da bei dessen Überschreitung ein hoher Strom fließt. Allerdings wird kein Silikontyp nach dem unmittelbaren Erreichen des Schaltpunktes zerstört. Eine Verbesserung durch die Silanisierung respektive die geänderte Silikonmatrix ist allerdings im Fall beider Schaltpunkte zu erkennen. Deutlichere

Tabelle 6.8.: Ergebnis der Untersuchungen zur Leistungsaufnahme

Typ	B-1000	C-1000	B-500	C-500
$\hat{e}_d$ in V/mm	1558	1643,8	1128	1000
$s(\hat{e})$ in V/mm	8,9	21,9	32,15	47,7
$\hat{j}$ in mA/mm <sup>2</sup>	73,73	15,77	2221	942,9
$s(\hat{j})$ in mA/mm <sup>2</sup>	35,8	7,05	1814	654,3
$P'_{\text{avg}}$ in mW/mm <sup>3</sup>	0,55	0,15	9,19	4,47
$s(P'_{\text{avg}})$ in mW/mm <sup>3</sup>	0,05	0,04	0,08	0,13

Unterschiede zeigen sich bei den Durchschlag-Stromdichten. Auffällig sind die signifikant höheren Stromdichten bei den Materialien mit den niedrigeren Schaltpunkten  $E_b = 500\text{ V/mm}$ . So kann in diesem Fall ein deutlich resistiverer Strom beobachtet werden. Dagegen werden die beiden Typen mit  $E_b = 1000\text{ V/mm}$  unmittelbar nach Erreichen des nichtlinearen Kennlinienbereichs zerstört. Die offenkundige Abhängigkeit des Mechanismus von den unterschiedlichen Mikrovaristoren kann

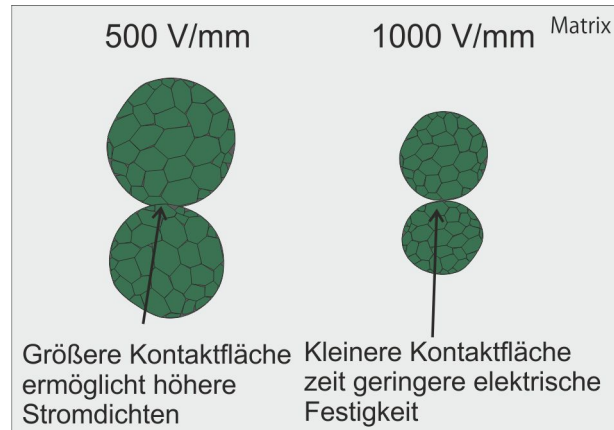


Abbildung 6.17.: Modell der unterschiedlichen Kontaktflächen für die Mikrovaristoren der  $E_b = 500 \text{ V/mm}$  und  $E_b = 1000 \text{ V/mm}$

sowohl in deren unterschiedlicher Größe als auch deren elektrischer Charakteristik begründet sein. Im Durchschnitt kleinere Mikrovaristoren bei den höheren Schaltpunkten bedeutet mehr Varistoren und damit auch mehr Übergänge im Polymer. Beim Schaltpunkt  $E_b = 500 \text{ V/mm}$  wird der Prüfling aufgrund der thermischen Überlastung des Stromes zerstört. Diese hohen Stromdichten sind möglich, da die Kontaktfläche zwischen den einzelnen Partikeln größer ist. Die relativ hohe Streuung der Stromdichte liegt in der unterschiedlichen Stromaufteilung begründet, die in Abschnitt 6.4.1 beschrieben ist. Die umgesetzten Verlustleistungsdichten  $P'_V$  sind ebenfalls in Tabelle 6.8 dargestellt. Trotz der sehr großen Abweichungen, die in der nichtlinearen Kennlinie des Materials begründet sind, erlauben sie doch eine Abschätzung der Größenordnung der umgesetzten Verlustleistung. Diese reicht nicht aus, um den Prüfling signifikant zu erwärmen. Dementsprechend werden die Prüflinge während den Untersuchungen bewusst nicht erwärmt, um diesen Effekt beobachten zu können. An der Kennlinie selbst ist wiederum das PTC-Verhalten des Widerstandes zu erkennen, das die Zerstörung des Prüflings allerdings nur unwesentlich verzögert. Dagegen wird das gefüllte Silikon mit höherem Schaltpunkt  $E_b = 1000 \text{ V/mm}$  vermutlich dielektrisch durch die anliegende Feldstärke zerstört, da die Kontakte zwischen den einzelnen Mikrovaristoren der elektrischen Belastung nicht widerstehen können und gleichzeitig die auftretende Stromdichte wesentlich geringer ist. Die Ursache liegt in den unterschiedlichen relativen Permittivitäten des ZnO und des Silikons  $\frac{\epsilon_{r,\text{ZnO}}}{\epsilon_{r,\text{SiR}}} \approx 350$  begründet, die zu einer zusätzlichen Feldverdrängung in die Grenzschicht führen. Angedeutet sind die vom Schaltpunkt abhängigen Kontakte in **Abbildung 6.17**.

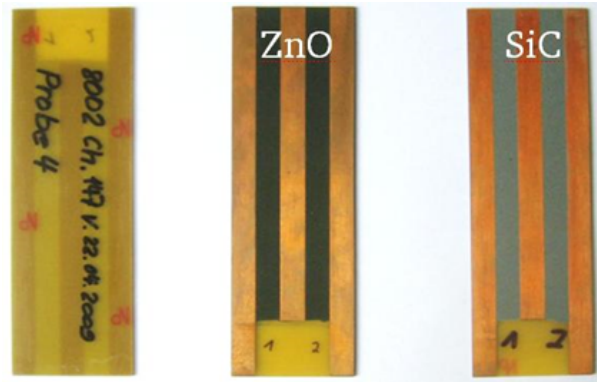


Abbildung 6.18.: Beispiele der verwendeten Prüflinge mit einem mikrovaristorgefüllten und einem konventionellen SiC-Lack

## 6.5. Temperaturabhängige Charakterisierung gefüllter Lacke

Im Gegensatz zu den mikrovaristorgefüllten Silikonen werden die gefüllten Phenolharze nur als resistiv steuernde Schicht eingesetzt (siehe Abschnitt 4.2 und Kapitel 8). Diese Lacke selbst können auf unterschiedliche Art vermessen werden. Da nur dünne Schichten  $d < 500 \mu\text{m}$  verwendet werden, ist eine Schutzringanordnung nicht sinnvoll zu applizieren, da die Distanz zwischen den Messelektroden größer ist als jeweils zur geerdeten Gegenelektrode. Zudem sind radiale Anordnungen der Messelektroden für Materialien mit stark-nichtlinearen Eigenschaften nicht geeignet. Dementsprechend muss auf sie verzichtet werden. Ein Beispiel der verwendeten Lackproben ist in **Abbildung 6.18** wiedergegeben<sup>14</sup>. Der leitfähige Lack ist zwischen geätzte Kupferbahnen mit einer Dicke von  $a = 70 \mu\text{m}$  aufgetragen. Die Messdistanz zwischen den Kupferbahnen beträgt  $d = 10 \text{ mm}$  bei einer Breite von  $b = 100 \text{ mm}$ . Aus diesen Dimensionen wird eine  $E$ - $J$ -Kennlinie abgeleitet. Aufgrund der Dicke kann aber nicht klar zwischen Oberflächen- und Volumenstrom unterschieden werden. Im Folgenden sollen zwei typische  $E$ - $J$ -Kennlinien eines mikrovaristorgefüllten Phenolharzlackes gezeigt werden. Die Charakterisierung erfolgt temperaturabhängig bei Wechsel- und bei Gleichspannung. Verwendet werden jeweils die zuvor beschriebenen Algorithmen. **Abbildung 6.19** zeigt die  $E$ - $J$ -Kennlinie bei Gleichspannung und **Abbildung 6.20** den Vergleich dazu bei Wechselspannung. Generell können aber bei diesen dünnen Schichten kapazitive Stromanteile quantitativ nicht zwischen dem Anteil des Lackes und der restlichen Anordnung (Luft und Grundplatte) unterschieden werden. Darum werden nur der Scheitelwert  $\hat{i}$  und der resistive Stromanteil  $i_{\text{res}}$  gezeigt. Es zeigt sich aber in beiden Fällen, dass sich die Matrix selbst stabil verhält und die Kennlinie dem

---

<sup>14</sup>Mit freundlicher Unterstützung durch Hrn. A. Lutz, Von Roll Insulation

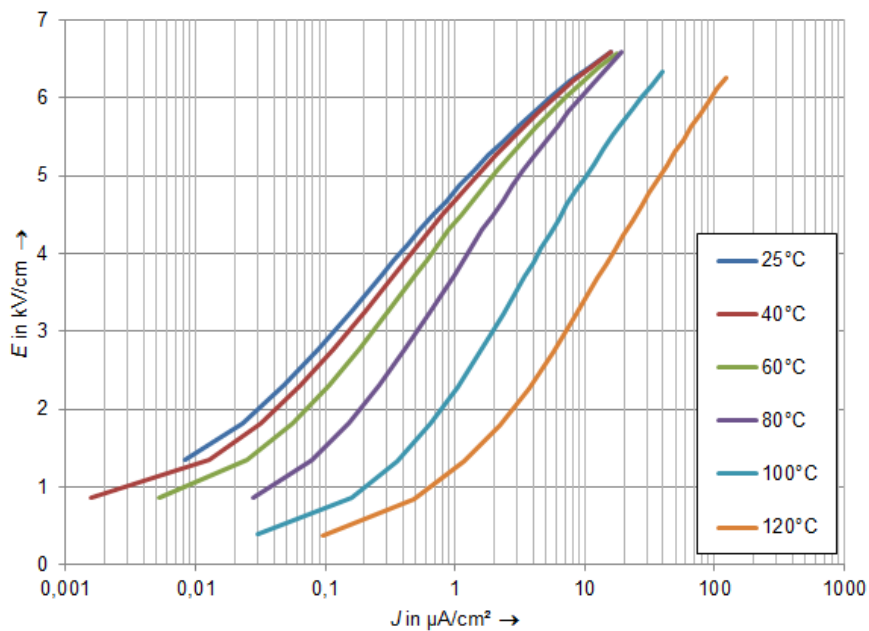


Abbildung 6.19.: Temperaturabhängige  $E$ - $J$ -Kennlinie eines mikrovaristorgefüllten Lackes bei Gleichspannung. Der Schalterpunkt beträgt ca.  $E_b = 500 \text{ V/mm}$

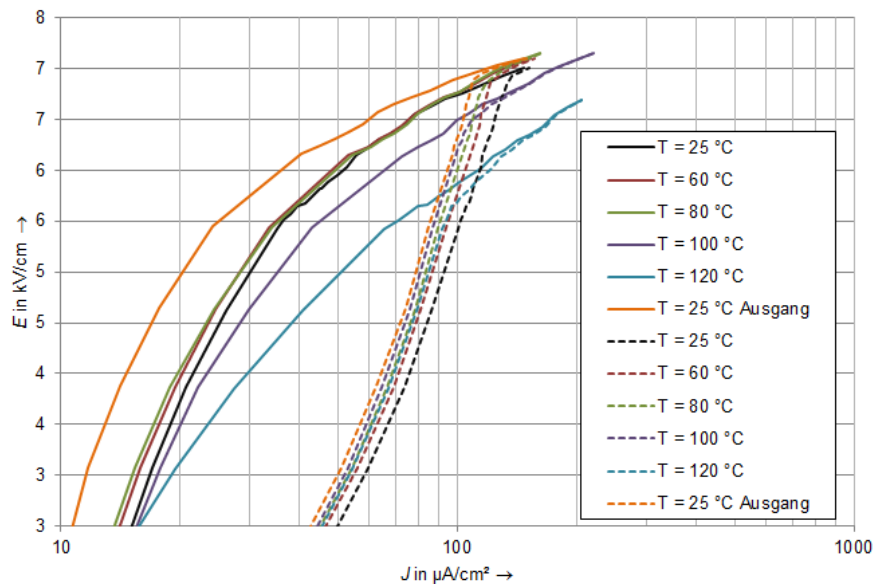


Abbildung 6.20.: Temperaturabhängige  $\hat{E}$ - $\hat{j}$ -Kennlinie eines mikrovaristorgefüllten Lackes bei Wechselspannung; strichliert:  $\hat{j}$ ; durchgezogen:  $\hat{j}_{res}$ ; Der Schalterpunkt beträgt ca.  $E_b = 500 \text{ V/mm}$

NTC-Verhalten des Widerstandes entspricht, das man vom ZnO und auch einem Isolierstoff erwartet. Im Leckstrombereich zeigt sich sowohl bei Wechsel- als auch bei Gleichspannung, dass die Leitfähigkeit mit zunehmender Temperatur zunimmt. Im Vergleich zu den Untersuchungen am mikrovaristorgefüllten Silikon zeigt sich, dass das Verhalten in Abhängigkeit der Temperatur sowohl vom Füllstoff als auch dem gewählten Polymer selbst abhängig ist. Eine entsprechende Berücksichtigung dieses Verhaltens erfolgt in Kapitel 8.

### 6.6. Aussagekraft der vorgestellten Untersuchungen

Die Ergebnisse zeigen, dass die Leistung, die während der Zerstörung der Proben im mikrovaristorgefüllten Silikon umgesetzt wird, marginal ist. Dementsprechend kann nicht von einem signifikanten Energieaufnahmevermögen des gefüllten Materials ausgegangen werden. Generell hat sich zudem in den Untersuchungen gezeigt, dass die Aussagen nur für den jeweiligen Verbund aus Mikrovaristorpulver und Polymertyp getroffen werden können. So haben sich zum Beispiel prinzipielle Unterschiede zwischen den gefüllten Silikonen und den Phenolharzen gezeigt. Die jeweiligen Abhängigkeiten von Einflussfaktoren wie Temperatur oder mechanischer Dehnung müssen für die einzelnen Anwendungen berücksichtigt werden. Wichtig ist dementsprechend die Berücksichtigung der im gefüllten Polymer auftretenden Grenzschichten:

- Zwischen Polymer und Partikel
- Zwischen zwei Mikrovaristorpartikeln

Der erste Aspekt ist vor allem bei der Optimierung der mechanischen Eigenschaften der hoch gefüllten Polymere zu berücksichtigen. Im Weiteren muss der Einfluss dieser Grenzschicht bei Grenzflächen zu anderen Isolierstoffen oder Elektroden berücksichtigt werden. Klassischerweise ist hier eine Kabelgarnitur zu nennen. Die Grenzschicht zwischen zwei Mikrovaristorpartikeln wird im Wesentlichen durch das verwendete Polymer und den Füllgrad der Mikrovaristoren bestimmt. Durch eine Silanisierung des Mikrovaristorpulvers wird zwar die Einbindung der Mikrovaristoren in die Silikonmatrix verbessert, aber auch die Grenzfläche beeinflusst. Allerdings überwiegen die Vorteile der besseren thermischen und mechanischen Stabilität.

Generell zeigt sich ein signifikanter Einfluss der Anbindung der mikrovaristorgefüllten Feldsteuerschicht an die Elektroden selbst. Dieser Effekt der Anpresskraft ist unabhängig davon, ob sie auf Potential liegen oder geerdet sind. Dies gilt sowohl für die auftretenden Stromdichten und die damit verbundenen Verluste als auch für die



Entwicklung der Teilentladungen. Für aussagekräftige Messungen sind bei plattenförmigen Prüflingen Schutzringanordnungen zu verwenden, um homogene Felder zu ermöglichen und gleichzeitig auftretende Oberflächenströme zu vermeiden. Bei radialsymmetrischen Feldern können mit einer Schutzringanordnung dagegen nur die Oberflächenströme vermieden werden. Im weiteren müssen Umgebungsparameter wie die Temperatur geregelt werden. Diese Aspekte sind elementar für die Untersuchungen der Anwendungen und werden in den jeweiligen Kapiteln vertieft.



## 7. Verbundlangstabilisatoren mit mikrovaristorgefüllten Silikonelementen

### 7.1. Übersicht der untersuchten Isolatormodelle

Im folgenden Kapitel wird beschrieben, ob sich mikrovaristorgefüllte Polymere als lokale oder sogar globale Feldsteuerung an einem Verbundisolator eignen. Als lokale Feldsteuerung kann z.B. die Unterdrückung der Wassertropfenkorona auf der Isolatoroberfläche betrachtet werden. Die Vermeidung von Trockenzonenüberschlägen ist ebenfalls eine lokale Steuerung, die aber auch die globale Potentialverteilung entlang des Strunkes beeinflusst. Wenn diese unabhängig von dem Einsatzgebiet des Isolators beeinflusst werden kann, eignen sich mikrovaristorgefüllte Silikone auch zur globalen Steuerung von Verbundlangstabilisatoren. Eine Übersicht der durchgeführten Versuche, geordnet nach der lokalen und globalen Steuerwirkung der mikrovaristorgefüllten Polymere ist in **Tabelle 7.1** gegeben. Die Untersuchungen

Tabelle 7.1.: Übersicht über die durchgeführten Versuche

Lokale Steuerung	
Aussteuerung eines Modellisolators	Abschnitt 7.2.1.1
Überschlagspannung von Trockenzonen	Abschnitt 7.2.1.2
$U$ - $I$ -Kennlinie von Strünken	Abschnitt 7.2.1.3
Salznebelprüfungen	Abschnitt 7.2.2
Versuche mit künstlicher Beregnung	Abschnitt 7.2.4 und 7.2.3
Thermisches Verhalten	Abschnitt 7.2.5
Globale Steuerung	
Überschlagspannung bei Wechselspannung	Abschnitt 7.3.1
Überschlagspannung bei Stoßspannung	Abschnitt 7.3.2
Verteilung elektrisches Feld	Abschnitt 7.3.3

Tabelle 7.2.: Charakteristische Eigenschaften zweier Verbundlangstabilisatoren mit  $U_m = 170 \text{ kV}$  und  $U_m = 420 \text{ kV}$

Typ	Schirme	Länge $l_i$	Schlagweite $l_s$	Kriechweg $l_k$
$U_m = 420 \text{ kV}$	47	3000 mm	2800 mm	8400 mm
$U_m = 170 \text{ kV}$	17	1600 mm	1385 mm	3400 mm

werden an Isolatoren mit  $U_m = 170 \text{ kV}$  und  $U_m = 420 \text{ kV}$  sowie einigen darauf basierenden Modellisolatoren durchgeführt, die z.B. in Kaltnebelkammern untersucht werden. Die Abmessungen der beiden Isolatorotypen sind in **Tabelle 7.2** zusammengefasst. Sämtliche Verbundisolatoren mit mikrovaristorgefüllten Silikonelementen werden unter Laborbedingungen aus einem Baukastensystem der Firma LAPP Insulators aufgebaut<sup>15</sup>. Für die Untersuchungen werden sowohl mikrovaristorgefüllte Strünke als auch Schirme unterschiedlicher Schaltunkte  $E_b$  verwendet. Die Eigenschaften der verwendeten Isolatorstrünke mit einfach- und doppeltexturierten Silikonhüllen sind in **Tabelle 7.3** zusammengefasst. Zusätzlich wird deren Aufbau mit den unterschiedlichen Schichten in **Abbildung 7.1** gezeigt. Auf diese Stäbe können die Silikonschirme versuchsspezifisch aufgezoogen und mit einem Silikonkleber (siehe [Sil13a]) fixiert werden. Diese Klebung genügt allen Beanspruchungen, die während der Versuche, auch während der Fremdschichtprüfungen, auftreten. Die Wettability Class (WC) der verwendeten mikrovaristorgefüllten Silikone beträgt nach [IEC/TS 62073] WC1 - WC2 (siehe Abbildung A.5). Der GFK-Kern wird an den Enden freigelegt und mit Madenschrauben in der Armatur fixiert. Die Nahtstelle Armatur-Strunk muss durch ein konventionelles (siehe [Sil13b]) oder leitfähiges Silikon (siehe [Sil13d]) versiegelt werden. Letzteres gewährleistet eine galvanische Verbindung zwischen der mikrovaristorgefüllten Schicht und der Armatur. Generell

Tabelle 7.3.: Unterschiedliche Abmessungen und Schaltunkte der verwendeten einfach- und doppeltexturierten Strünke nach Abbildung 7.1

Strunk	$R_{\text{GFK}}$ in mm	$R_i$ in mm	$R_a$ in mm	$E_b$ in V/mm
Einfachextrudiert(ee)	16	-	22	1200
Doppeltexturiert(DE)	16	22,6	30,5	1200
Doppeltexturiert(de)	16	19	22	500, 1200

werden die in Kapitel 6 untersuchten mikrovaristorgefüllten Silikone verwendet. Die einfachextrudierten Strünke werden zunächst für grundlegende Untersuchungen der Wirkungsweise mikrovaristorgefüllter Silikone als lokale und globale Feldsteue-

<sup>15</sup>Besonderer Dank gilt Hrn. Dr.-Ing. Jens M. Seifert für die hervorragende Unterstützung

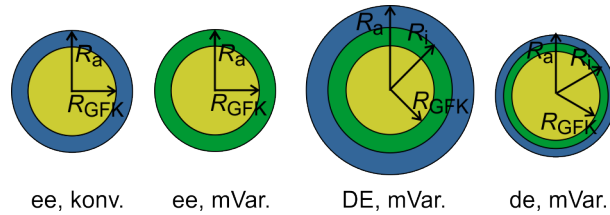


Abbildung 7.1.: Querschnitte der untersuchten einfach- und doppeltextrierten Verbundisolatoren

rung der Verbundisolatoren verwendet. Die doppeltextrierten Strünke verfügen dagegen über eine den Glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK)-Kern umhüllende mikrovaristorgefüllte Schicht sowie eine zweite, äußere Silikonhülle. Diese Konfiguration trägt der unzureichenden Freiluftbeständigkeit des mikrovaristorgefüllten Silikons Rechnung und ermöglicht die Fertigung erster Prototypen, die unter realen Bedingungen eingesetzt werden können. Ein Beispiel eines solchen doppeltextrierten Isolators zeigt **Abbildung 7.2**. Die montierten Schirme verfügen über ein

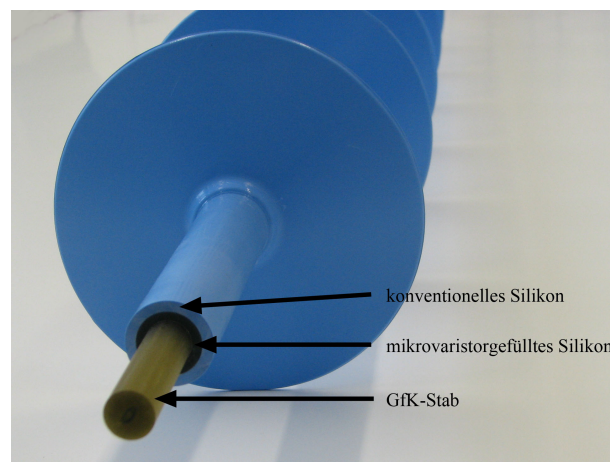


Abbildung 7.2.: Aufbau eines doppeltextrierten Isolators

aerodynamisches Profil, so dass Verschmutzungen gezielt durch Winde abgetragen werden können. Sie erleichtern zudem die optischen Betrachtungen während der in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen. Die mikrovaristorgefüllte Schicht hat auf dem Strunk die gleiche Stärke ( $d = 3 \text{ mm}$ ) wie die konventionelle. Zusätzlich unterscheiden sich die Isolatoren im Schaltpunkt des Silikons. Verwendet wird zum überwiegenden Teil ein mikrovaristorgefülltes Silikon mit  $E_b = 1200 \text{ V/mm}$ . Lediglich die doppeltextrierten Strünke des Typs (de) (Tabelle 7.3) verfügen über einen geringeren Schaltpunkt  $E_b = 500 \text{ V/mm}$ . In Tabelle A.1 werden die Spezifikationen der Isolatoren mit  $U_m = 170 \text{ kV}$  und in Tabelle A.2 die Isolatoren mit  $U_m = 420 \text{ kV}$  aufgezeigt. Zusätzlich hergestellte Modellisolatoren für Überslagversuche werden gesondert erwähnt. Die verwendete Nomenklatur der Isolatoren wird in **Abbildung**

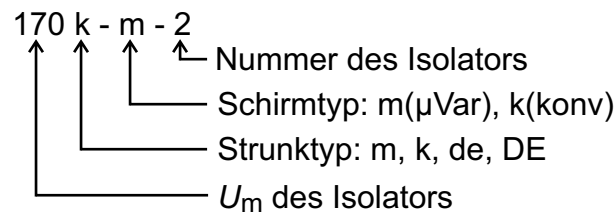


Abbildung 7.3.: Beispiel für die Nomenklatur der untersuchten Isolatoren

7.3 zusammengefasst.

## 7.2. Wirkung als lokale Feldsteuerung

### 7.2.1. Versuche an Modellanordnungen

Für die Beurteilung der Wirkungsweise von mikrovaristorgefüllten Silikonelementen sind einige Grundlagenbetrachtungen notwendig. Da neben einer durchgängigen Beschichtung des kompletten Langstabilisators auch Teilbeschichtungen untersucht werden, wird die Frage diskutiert, inwieweit das Material durch ein externes elektrisches Feld ohne galvanische Verbindung zu einer Elektrode, respektive einer Armatur angesteuert werden kann, um hohe elektrische Feldstärken auf der Oberfläche zu unterdrücken. Die Messung der Kennlinie an Teilstücken von beschichteten Isolatoren zeigt zunächst den Einfluss der Prüflingslänge auf die elektrische Charakteristik des Isolators auf. Diese Untersuchungen zeigen, inwieweit die Möglichkeit besteht, durch mikrovaristorgefüllte Beschichtungen eine verbesserte Potentialverteilung am kompletten Isolator zu erreichen. Die Ergebnisse werden im Weiteren dahingehend ausgewertet, ob die  $U$ - $I$ -Charakteristik für die Überbrückung entstehender Trockenzone ausreicht. Diese Betrachtungen werden durch Untersuchungen zum Verhalten von Teilüberschlägen verifiziert.

#### 7.2.1.1. Aussteuerung im elektrischen Feld

Eine erste Versuchsreihe wird mit einer zylinderförmigen Probe ( $l_i = 120$  mm,  $D = 20$  mm) des mikrovaristorgefüllten Silikons vom Typ A-1200 durchgeführt. Die Stirnflächen werden mit einem Graphitleitlack kontaktiert, bevor der Prüfling in Messingelektroden verspannt wird (siehe Abbildung B.9). Am Prüfling werden mit der Infrarotkamera ThermoCAM<sup>TM</sup> PM 695 (siehe Tabelle B.5 und [FLI01]) drei Messpunkte ausgewertet. Eine Erwärmung kann aber bei einer Prüfspannung von  $U_p = 55$  kV auch nach  $t = 195$  min nicht festgestellt werden. Das heißt, in einer Modellanordnung mit einem in Längsrichtung beanspruchten zylinderförmigen Prüfling kann keine mittlere Feldstärke in der Größenordnung des Schaltpunktes

erreicht werden, die das Material signifikant erwärmt:

$$\frac{\sqrt{2} \cdot U_P}{l_i} = \frac{77,8 \text{ kV}}{120 \text{ mm}} = 648 \frac{\text{V}}{\text{mm}} \ll E_b = 1200 \frac{\text{V}}{\text{mm}} \quad (7.1)$$

Das Ergebnis ist trivial, da die Überschlagsspannung einer solchen Modellanordnung geringer ist als die resultierende Schaltspannung. Dies bedeutet aber, dass erst bei Materialien mit  $E_b = 300\text{--}500 \text{ V/mm}$  Erwärmungen erwartet werden können. Zu hohe globale Ableitströme können hier aber ausgeschlossen werden. Auch wenn das Material nicht vollständig angesteuert werden konnte, sind die Ergebnisse ein Hinweis auf mögliche Effekte der Länge der einzelnen Mikrovaristorketten im gefüllten Polymer. Das Aspektverhältnis  $L_{\text{Strunk}}/A_{\text{Querschnitt}} = 0,38/\text{mm}$  des Prüflings ist um den Faktor 520 größer als bei der Elektrodenanordnung Typ1 nach Tabelle 6.1 mit  $a_{\text{Platte}}/A_{\text{Elektrode}} = 0,00075/\text{mm}$ . Dementsprechend weniger und längere Ketten der Mikrovaristoren stehen für den Stromfluss zur Verfügung. Zusätzlich kann nicht davon ausgegangen werden, dass die mikrovaristorgefüllte Schicht homogen vom anliegenden elektrischen Feld durchdrungen wird. Höhere Spannungen können aufgrund von Teilentladungen und folgenden Überschlüssen nicht geprüft werden.

Die Aussteuerung im elektrischen Feld ohne galvanische Ankopplung ist zwingend erforderlich für die Anwendungsmöglichkeiten der doppeltextrudierten Strünke. Aus diesem Grund wird eine mikrovaristorgefüllte Silikonplatte zwischen zwei Silikonplatten gebracht, die mit  $\epsilon_r = 15$  über eine ähnliche relative Permittivität verfügen. Dies ist notwendig, um eine nennenswerte elektrische Feldstärke in der mikrovaristorgefüllten Platte zu erreichen. Der Aufbau ist in **Abbildung 7.4** dargestellt. Die über die mikrovaristorgefüllte Platte abfallende Spannung  $\hat{u}_{\text{mVar}}$  wird an zwei Elektroden gemessen.

An die beiden äußeren Elektroden wird die externe Spannung  $\hat{u}_P$  angelegt. Die Änderung des Verhältnisses  $\hat{u}_{\text{mVar}}/\hat{u}_P$  in Abhängigkeit der Aussteuerung des mikrovaristorgefüllten Materials und der Scheitelwert des Stromes sind in **Abbildung 7.5** zusammengefasst.

Es ist zu erkennen, dass sich zunächst eine rein kapazitive Aufteilung der Spannung  $\hat{u}_{\text{mVar}}/\hat{u}_P \approx 0,3\text{--}0,4$  ergibt, die dem Verhältnis der relativen Permittivitäten und der Schichtdicken entspricht. Für höhere Feldstärken reduziert sich das Verhältnis auf  $\hat{u}_{\text{mVar}}/\hat{u}_P \approx 0,15$ , da die Feldstärke im mikrovaristorgefüllten Silikon im Bereich des Schaltpunktes  $E_b = 1200 \frac{\text{kV}}{\text{cm}}$  begrenzt wird. Dies bedeutet, dass das elektrische Feld in die beiden isolierenden Platten gedrängt wird. Damit ist nachgewiesen, dass sich ein mikrovaristorgefülltes Silikon auch ohne einen direkten Kontakt zu einer Elektrode durch ein externes äußeres Feld aussteuern lässt. Diese wichtige Voraussetzung muss erfüllt sein, um das Material als lokale Steuerung einsetzen

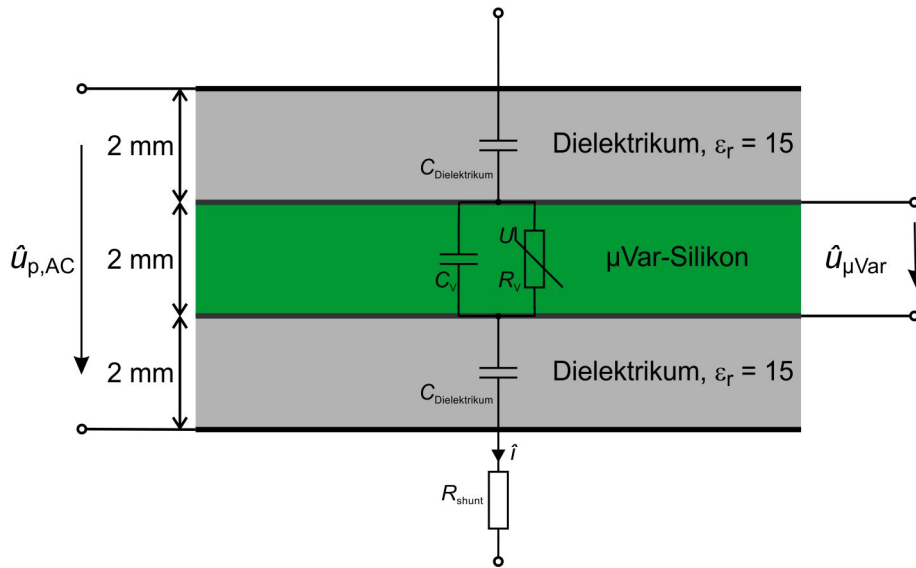


Abbildung 7.4.: Verwendetes Modell zur Aussteuerung des mikrovaristorgefüllten Silikons zwischen zwei Platten mit einem ähnlich hohen  $\epsilon_r = 12$

zu können. Allerdings deutet sich an, dass in Abhängigkeit der Anordnung der mikrovaristorgefüllten Schicht zu einer rein isolierenden Schicht die Gefahr besteht, dass das elektrische Feld in diese Isolierung verdrängt wird. Entsprechende Effekte werden in Abschnitt 7.2.1.3 untersucht.

### 7.2.1.2. Teilüberschläge von Modellisolatoren

Die Entwicklung von Teilentladungen sowie der Überschlag einer Trockenzone bei Wechselspannung wird zunächst an Modellisolatoren untersucht (siehe **Tabelle 7.4** und Abbildung A.6).

Tabelle 7.4.: Daten der Modellisolatoren, an denen die Trockenzonen untersucht werden

	TM-k	TM-m	TM-k-mS1	TM-k-mS2
Strunk	konv.	mVar.	konv.	konv.
Schirme	konv.	konv.	mVar.	mVar.
Schaltpunkt $E_b$	n.v.	1200 V mm <sup>-1</sup>	n.v.	1200 V mm <sup>-1</sup>
$\epsilon_{r,FSE}$	n.v.	$\approx 13$	$\approx 6$	$\approx 13$

Durch das Modell TM-m wird der Einfluss eines mikrovaristorgefüllten Strunkes auf eine Trockenzone im Gegensatz zu einem konventionellen Strunk TM-k untersucht. Auf Basis dieser konventionellen Variante werden die Schirme zweier weiterer Modellisolatoren, TM-k-mS1 und TM-k-mS2, mit mikrovaristorgefüllten Silikonplat-



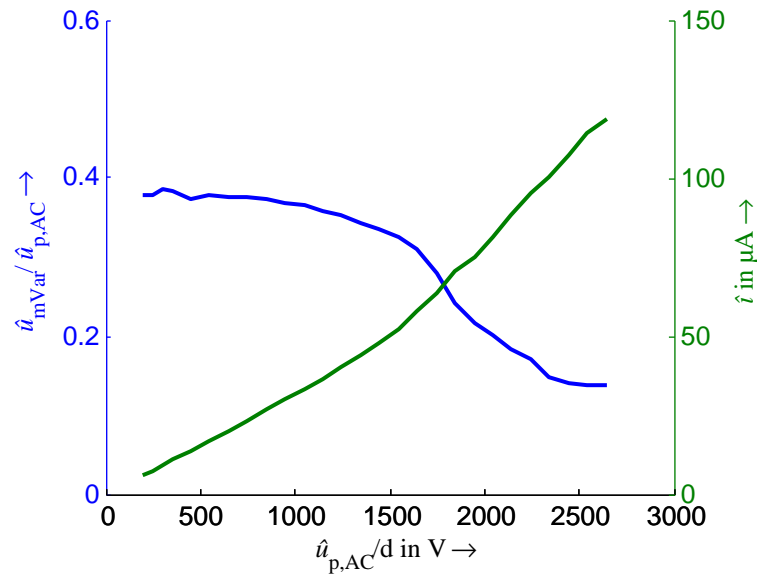


Abbildung 7.5.: Auswertung der Aussteuerung einer geschichteten Anordnung (siehe Abbildung 7.4,  $E_b = 1200 \text{ V/mm}$ )

ten unterklebt (siehe Abbildung A.7). Die Aufnahme der Teilentladungen erfolgt bei  $\hat{u} = 35 \text{ kV}$ ,  $40 \text{ kV}$  und  $45 \text{ kV}$  mit einer Tageslicht-UV-Kamera (siehe Tabelle B.3), die eine Lokalisierung der Teilentladungen ermöglicht. Das leitfähige Elektrolyt wird durch einen halbleitenden Lack nachgebildet, der einen Oberflächenwiderstand  $R' \approx 4 \text{ k}\Omega$  besitzt. Die Schirmunterseite sowie ein  $l = 40 \text{ mm}$  langer Bereich unterhalb der Schirme bleiben frei und bilden eine Trockenzone mit einem Kriechweg von  $l_k = 115 \text{ mm}$  und einer Schlagweite  $l_s = 85 \text{ mm}$  nach. Die Entwicklung der Entladungen mit steigender Spannung ist in **Abbildung 7.6** dargestellt.

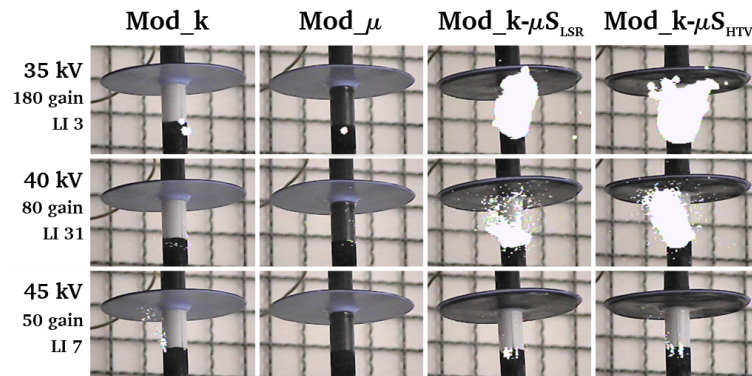


Abbildung 7.6.: Entwicklung von Teilentladungen an Modellisolatoren mit mikrovaristorgefüllten Silikonelementen

Da die Empfindlichkeit der UV-Kamera mit steigender Spannung reduziert wird, sind jeweils nur die Aufnahmen einer Spannungsstufe vergleichbar. Der Vergleich

des mikrovaristorgefüllten Strunks TM-m mit dem konventionellen TM-k zeigt, wie die feldsteuernde Schicht die elektrische Feldstärke am Ende der leitfähigen Schicht begrenzt und so den Einsatz von Entladungen mit zunehmender Spannung verringert. Die Folge ist eine im Vergleich zum konventionellen Modell um 10 % erhöhte Überschlagspannung, wie **Tabelle 7.5** zu entnehmen ist. Auffällig sind die Entladungen an den beiden Modellen mit mikrovaristorgefüllten Silikonschirmen, TM-mS1 und TM-mS2, die deutlich höhere Entladungen zeigen als die beiden anderen Modelle. Das mikrovaristorgefüllte Silikon des Modells TM-mS2 entspricht dem untersuchten Strunkmaterial. Dagegen ist der Schirm von TM-mS1 nicht so hoch gefüllt, aufgrund dessen er zwar über eine erhöhte relative Permittivität  $\epsilon_r = 6$  verfügt, aber über keine messbare nichtlineare Leitfähigkeit. Diese Eigenschaften führen dazu, dass die elektrischen Feldlinien nicht mehr im Wesentlichen an der Schirmkante enden, sondern gestaucht werden und die unterklebten Schirme nahezu senkrecht durchdringen. Diese erhöhte Entladungsaktivität führt allerdings nicht zu niedrigeren Überschlagspannungen (Abschnitt 7.5). Die Überschläge selbst erfolgen entlang des Kriechweges.

Tabelle 7.5.: Überschlagspannung bei Wechselspannung an Modellisolatoren. Das vollständige Ergebnis ist in Tabelle A.3 abgebildet

	TM-k	TM-m	TM-k-mS1	TM-k-mS2
$\hat{u}_{d-50}$	52,7 kV	58,1 kV	58 kV	56,4 kV

Eine Bestätigung dieser Untersuchungen findet sich in der Literatur. In [AR12a] wird das Überschlagverhalten von Verbundisolatoren für  $U_n = 11$  kV untersucht, deren Armaturen mit Konen aus mikrovaristorgefülltem Silikon ausgestattet sind. Prüfungen mit Blitzstoßspannung werden sowohl trocken als auch unter Verschmutzung durchgeführt. Am trockenen Isolator ( $u_{d-50} = 199$  kV) kann eine deutliche Verbesserung der mittleren Durchschlagspannung gegenüber dem konventionellen Isolator ( $u_{d-50} = 165$  kV) erreicht werden. Dagegen sind die Unterschiede am verschmutzten Isolator allerdings nicht so deutlich ausgeprägt.

### 7.2.1.3. Bestimmung der *U-I*-Charakteristik von mikrovaristorgefüllten Isolatorstrunkmodellen

(Modell-)Isolatoren, deren Strunkhülle aus einem mikrovaristorgefüllten Silikon mit einem Schaltspunkt  $E_b = 500\text{--}1200$  V/mm besteht, können unter atomosphärischen Normalbedingungen nicht angesteuert werden, da die Prüflinge im Leckstrombereich bereits überschlagen. Für die Untersuchung des hochleitfähigen Bereiches ist eine Prüfung unter Schutzatmosphäre oder eine unter Öl notwendig. Dabei muss sowohl bei einem Mineral- als auch bei einem Silikonöl von einer Beeinflussung

ausgegangen werden. Gleichmaßen ist auch ein Schutzgas (hier:  $\text{SF}_6$ ) aufgrund der hohen Gasdurchlässigkeit des Silikons nicht ohne Einfluss. Daher werden beide Varianten zur Kennlinienmessung untersucht. Zunächst werden zwei Varianten in Öl untersucht, die an der Strunkoberfläche kontaktiert werden. Typ a verfügt über einen Schirm und wird durch Ringelektroden, die sich 0,25 mm tief in die Strunkhülle pressen, kontaktiert. Bei Typ b handelt es sich um den reinen Strunk, der durch aufgetragene Silberlackelektroden kontaktiert wird. Die aufgebauten Modelle sind in **Tabelle 7.6** zusammengefasst.

Tabelle 7.6.: Daten der in Öl und  $\text{SF}_6$  untersuchten Prüflinge. Die Nomenklatur der Strünke entspricht Tabelle 7.3.

Name	Elektrodenform	$E_b$ in V/mm	Schlagweite $l_s$ in mm	Medium
MI-k-1	Typ a: Ringelektrode	-	34	Öl
MI-de-1	Typ a: Ringelektrode	500	34	Öl
MI-ee-1	Typ a: Ringelektrode	1200	34	Öl
MI-k-2	Typ b: Silberlack	-	30	Öl
MI-de-2	Typ b: Silberlack	500	30	Öl
MI-ee-2	Typ b: Silberlack	1200	30	Öl
MI-de-3	Typ c: Silberlack	500	80	$\text{SF}_6$
MI-de-4	Typ c: Silberlack	500	80	$\text{SF}_6$
MI-de-5	Typ c: Silberlack	1200	80	$\text{SF}_6$
MI-ee-3	Typ c: Silberlack	1200	80	$\text{SF}_6$

Neben der Messung der Kennlinie ermöglichen diese beiden Elektrodenkonfigurationen an Modellisolatoren zudem die Untersuchung, in wieweit es möglich ist, Trockenzonen durch einen leitfähigen Bypass kurzzuschließen und somit entstehende Trockenzonenüberschläge zu verhindern.

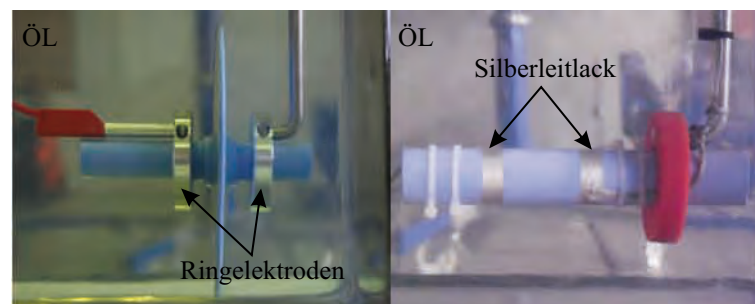


Abbildung 7.7.: Messung der  $\hat{u}$ - $\hat{i}$ -Kennlinie der Modellisolatoren nach Tabelle 7.6 in einem Silikonöl

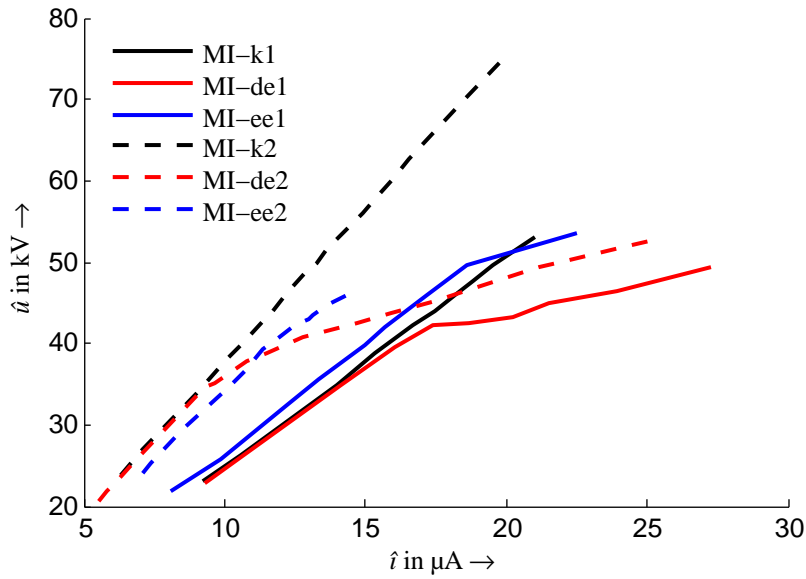


Abbildung 7.8.:  $\hat{u}$ - $\hat{i}$ -Kennlinien bei Wechselspannung von Modellisolatoren in Öl. Die Prüflinge MI-ee1, MI-ee2 und MI-de2 sind während der Versuche durchgeschlagen.

Die bei Wechselspannung aufgenommenen  $\hat{u}$ - $\hat{i}$ -Kennlinien sind in einem linearen Plot **Abbildung 7.8** zusammengefasst. Die Auswertung der Scheitelwerte erfolgt nach den in Abschnitt 6.2.4 vorgestellten Methoden. Im Fall der Modelle mit mikrovaristorgefüllten Silikonschichten ist der Strom erwartungsgemäß zunächst kapazitiv, bevor die Steigung  $\hat{u}$ - $\hat{i}$ -Kennlinie abnimmt und in den leitfähigen Bereich übergeht. Eine Separation in den kapazitiven und resistiven Teil ist in dieser Anordnung nicht zu realisieren. Der Vergleich mit den konventionellen Varianten zeigt, dass der kapazitive Strom selbstverständlich durch die Anordnung selbst bestimmt wird und nicht durch die mikrovaristorgefüllten Schichten, was sich in der linearen Abhängigkeit zeigt.

Da die Stromamplituden bei den Prüflingen MI-de1 und MI-de2 in der gleichen Größenordnung liegen, kann davon ausgegangen werden, dass der resistive Stromanteil im Wesentlichen durch das Volumen der mikrovaristorgefüllten Beschichtung fließt. Dies wird durch eine Betrachtung des Schadensbildes verdeutlicht, das in Abbildung C.5 und Abbildung C.6 zu sehen ist. Allerdings fällt das im Vergleich zum Schaltpunkt  $E_b$  des mikrovaristorgefüllten Silikons späte Durchschalten der beiden Isolatoren auf. Dies wird durch die Angabe einer auf die Länge der Isolatoren bezogenen Spannung deutlich:

$$\frac{\hat{u}}{l_i} = \frac{60 \text{ kV}}{30 - 34 \text{ mm}} = 1765 - 2000 \text{ V/mm} > E_b = 500 \text{ V/mm} \quad (7.2)$$

Auffällig sind zudem die beiden einfachextrudierten Strünke MI-ee1 und MI-ee2, die mit  $E_b = 1200 \text{ V/mm}$  zwar über einen höheren Schaltpunkt verfügen, die mikorvaristorgefüllte Schicht aber direkt kontaktiert ist. Dass ein resistiver Strom geflossen ist, wird anhand des Stromverlaufs über eine Periode (siehe **Abbildung 7.9**) festgestellt.

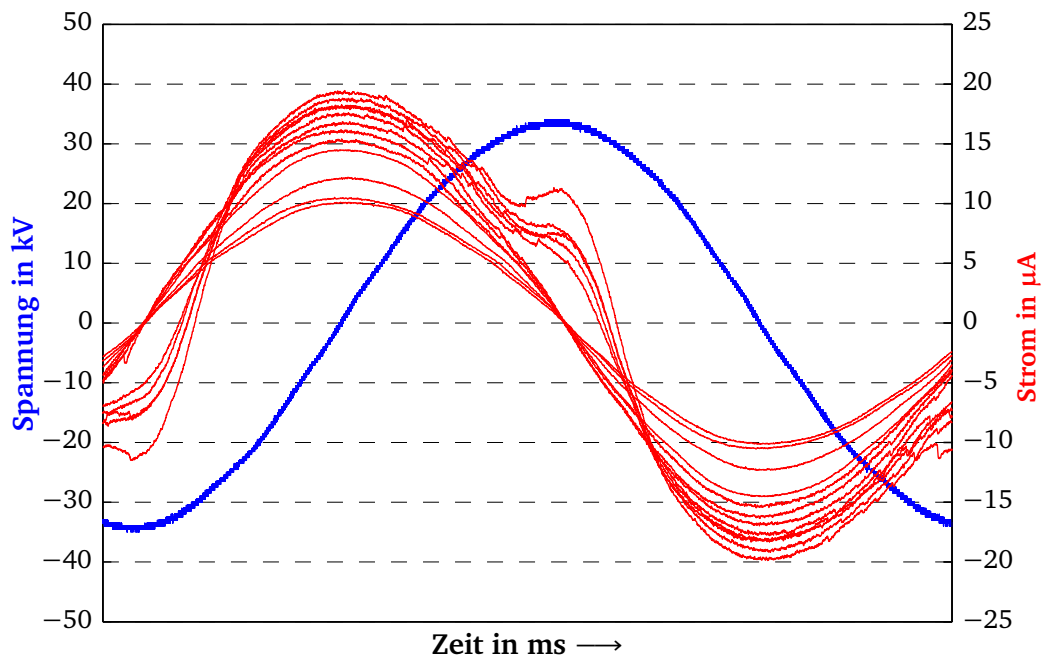


Abbildung 7.9.: Ausprägung des resistiven Stromes am Modellisolator MI-ee-2 bei Steigerung der Spannung von  $U = 24\text{--}46 \text{ kV}$ . Der Durchschlag erfolgt bei  $U_P = 47\text{--}48 \text{ kV}$  (Quelle: [Gie12]).

Wenn auch die Amplitude des resistiven Stroms im Verhältnis zum kapazitiven Strom geringer ist als bei den plattenförmigen Prüflingen nach Abschnitt 6.2, ist das deutliche Durchschalten der Mikrovaristoren zu erkennen. Hier ist nun der Vergleich zum Stromverlauf des doppeltextrudierten Strunkes von Interesse, der in **Abbildung 7.10** wiedergegeben ist. Die Ausprägung des resistiven Maximums ist im Vergleich zum ersten Verlauf nicht nur zur anliegenden Spannung phasenverschoben, sondern der Strom wird im Scheitelwert durch die Aussteuerung kapazitiver  $\phi \rightarrow 90^\circ$ . Dieser resultierende nichtlineare Verschiebungsstrom kann dementsprechend nicht feldreduzierend an der Oberfläche wirken und liefert einen Erklärungsansatz, warum die Ergebnisse der einfachextrudierten, mikorvaristorgefüllten Strünke in den später vorgestellten Berechnungsversuchen nicht direkt auf die doppeltextrudierten Stäbe übertragen werden können. Ein entsprechendes Ersatzschaltbild ist in **Abbildung 7.11** zu sehen. Es zeigt die kapazitive Anbindung

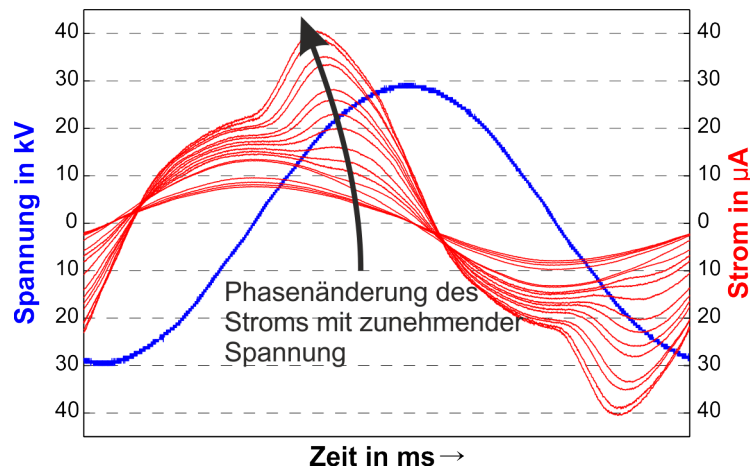


Abbildung 7.10.: Ausprägung des resistiven Stromes am Modellisolator MI-de-2 bei Steigerung der Spannung von  $U_P = 20,6\text{--}52,7\text{ kV}$ . Der Durchschlag erfolgt zwischen  $U_P = 54\text{--}55\text{ kV}$ .

der mikrovaristorgefüllten Schicht über die äußere Silikonhülle  $C_M$ . Ein letztes auffälliges Ergebnis ist die im Vergleich zu den konventionellen Prüflingen geringe elektrische Festigkeit der mikrovaristorgefüllten Prüflinge, die bis auf MI-de1 alle durchgeschlagen sind.

Die dielektrische Festigkeit wird mit stirnseitig kontaktierten Varianten weiter untersucht (siehe Typ c in **Tabelle 7.6**). Die Kontaktierung erfolgt durch einen Silberleitlack. Die Prüflinge haben eine Länge  $l_i$  bzw. Schlagweite von  $l_s = 80\text{ mm}$ . Die Untersuchung erfolgt bei Wechsel- und Gleichspannung. Beide Kennlinien werden in **Abbildung 7.12** dargestellt. Die Unterschiede zwischen Wechsel- und Gleichspannungscharakteristik entsprechen qualitativ denjenigen, die an plattenförmigen Prüflingen aufgenommen werden können. Allerdings zeigt sich ein deutlicher Einfluss der Länge auf den Schaltpunkt, der sich aus der auf die Länge bezogenen Spannung  $\frac{U_P}{l}$  ableiten lässt. Die möglichen Ursachen sind in der Geometrie der Prüflinge zu suchen. So kann nicht mehr von einer homogenen Aussteuerung des Materials ausgegangen werden, die durch die Querschichtung der Dielektrika zusätzlich negativ beeinflusst wird. Zudem vergrößert sich das Aspektverhältnis  $L_{\text{Strunk}}/A_{\text{Querschnitt}} = 1,03\text{--}2,23\text{ 1/mm}$  der Prüflinge im Vergleich zu den gefüllten Platten ( $a_{\text{Platte}}/A_{\text{Elektrode}} = 0,00075/\text{mm}$ ) signifikant um den Faktor 2970. Der Effekt, dass nur einzelne Pfade leitfähig sind, wird also noch verstärkt (siehe: [Gre04] [Gre10] und Kapitel 6).

Der Spannungsfall  $\Delta U \approx 3\text{ V}$  zwischen zwei Mikrovaristoren hat bei den Ketten-

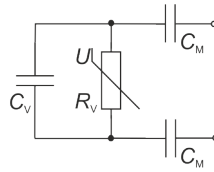


Abbildung 7.11.: Elektrisches Ersatzschaltbild des doppeltextrodierten Isolators. Die Anbindung der mikrovaristorgefüllten Schicht findet über die Kapazität  $C_M$  der konventionellen Hülle statt.

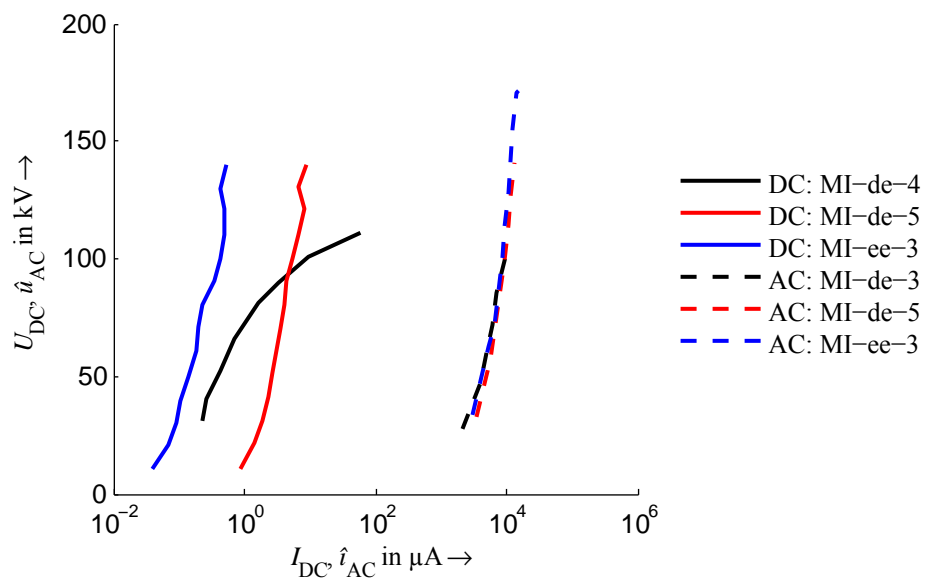


Abbildung 7.12.: Vergleich der Wechsel- und Gleichspannungskennlinien von Modellisolatoren in SF<sub>6</sub>

längen der untersuchten Modellisolatoren rechnerisch keinen Einfluss:

$$N_{\text{mVar.}} = \frac{l_i}{D_{\text{mVar}}} = \frac{80 \text{ mm}}{63 - 90 \text{ } \mu\text{m}} = 890 - 1270 \quad (7.3)$$

$$U_{\text{Kontakt}} = N_{\text{mVar.}} \cdot \Delta U = (890 - 1270) \cdot 3 \text{ V} = 2,67 - 3,85 \text{ kV} \quad (7.4)$$

Wie zuvor bei den Untersuchungen in Öl zeigt sich ebenso eine geringe dielektrische Festigkeit der Prüflinge. Die Durchschlagsspannungen sowie die bezogene Spannung sind in **Tabelle 7.7** zusammengefasst.

Tabelle 7.7.: Durchschlagsspannung der in SF<sub>6</sub> untersuchten Prüflinge

Name	$E_b$ in kV/mm	Durchschlag	$U_d$ bzw. $\hat{u}_d$ in kV	$E_d$ bzw. $\hat{e}_d$ in kV/cm
MI-de-3	500	AC	102	12,8
MI-de-4	500	DC	131,6	16,5
MI-de-5	1200	AC	140	17,5
MI-ee-3	1200	AC	172	21,5

Auffällig ist, dass diese (Durchschlag-)Feldstärken etwa dem 1,5 - 2 fachen der Schaltpunkte der Proben entsprechen. Sie sind damit deutlich geringer als die Durchschlagfeldstärke von konventionellem Silikon  $E_d = 200 \text{ kV/cm}$  [Bey86]. Der Zerstörungsmechanismus wird also durch den Schaltpunkt bestimmt. Die Ergebnisse begründen und rechtfertigen insgesamt den Einsatz von mikrovaristorgefüllten Polymeren mit einem Schaltpunkt  $E_b < 500 \text{ V/mm}$ , da nur so die notwendigen, lokal hohen Ströme fließen können, um eine Trockenzone wirkungsvoll überbrücken zu können. Dagegen müssen keine hohen Ableitströme entlang des ganzen Strunkes und damit dessen unzulässige Erwärmung befürchtet werden.

#### 7.2.1.4. Salznebelprüfungen

Ein 1000-h-Versuch in einer Salznebelkammer bei konstant anliegender Prüfspannung wird in Anlehnung an [IEC 62217] zur Prüfung der Kriechstromfestigkeit des Designs durchgeführt. Durch die Dauerbelastung wird gezielt die Hydrophobie der Silikonoberfläche unterdrückt. Der Nebel wird durch einen Defensor erzeugt und verfügt aufgrund der Salzmassenkonzentration  $m'_{\text{Salz}} = 8 \text{ kg/m}^3$  über eine definierte Leitfähigkeit. Die anzulegende Prüfspannung  $U_P$  ergibt sich abhängig vom Kriechweg  $l_k$  zu:

$$U_P = \frac{l_k}{34,6 \frac{\text{mm}}{\text{kV}}} = 22,7 \text{ kV} \quad (7.5)$$



Eine Aufzeichnung des Ableitstromes ist laut Prüfvorschrift nicht notwendig, liefert aber z.B. Erkenntnisse über den Zeitpunkt des Hydrophobieverlustes der Isolatoroberfläche. Geprüft werden acht Modellisolatoren mit unterschiedlichen Schirmkonfigurationen, die in Tabelle A.4 zusammengefasst sind. Jeweils eine Variante mit konventionellem und mikrovaristorgefülltem Strunk werden nach Norm horizontal und vertikal geprüft. Zudem werden vier weitere Varianten mit verkürztem Kriechweg bzw. mikrovaristorgefüllten Schirmen vertikal geprüft. Die Prüfung gilt als bestanden, wenn:

- keine leitfähigen Kriechspuren auftreten;
- die Erosionen  $d_{\text{Erosion}} < 3 \text{ mm}$  sind bzw. nicht die darunter liegende Schicht erreichen;
- keine Durchschläge des Materials auftreten;
- der Ableitstrom begrenzt bleibt  $\hat{i}_{\text{Ableit}} < 1 \text{ A}$ .

Leitfähige Kriechspuren und Durchschläge konnten an keinem der Prüflinge festgestellt werden. Lediglich am horizontal aufgehängten Isolator Sk-m2 zeigten sich Erosionen von  $d_{\text{Erosion}} = 1 - 2 \text{ mm}$ . Die Aufnahme der einzelnen Ableitsströme zeigte weder Auffälligkeiten noch Überschreitungen des Grenzwertes. Damit haben alle Modellisolatoren den Test bestanden. Ergänzend werden die Modellisolatoren SK-d1 und SK-d2 (siehe Abbildung A.8) betrachtet, die über einen doppeltextrudierten Strunk mit einem Schaltpunkt  $E_b = 500 \text{ V/mm}$  verfügen. Sie werden mit einer Spannung  $U_P = 22,3 \text{ kV}$  bei einer Salzmassenkonzentration  $m'_{\text{Salz}} = 8 \text{ kg/m}^3$  geprüft. In der aufgrund ihrer Größe nicht normkonformen Prüfkammer wird der Isolator SK-d1 vertikal und SK-d2 horizontal montiert. Der Salznebel wird wie zuvor durch einen Defensor erzeugt. Am Isolator SK-d1 konnten keine Auswirkungen beobachtet werden. Am horizontal montierten Isolator traten Erosionen  $d_{\text{Erosion}} < 3 \text{ mm}$  und leichte, nicht leitfähige Kriechspuren auf. Damit haben beide Modellisolatoren die Prüfung bestanden. Die zusätzliche Aufzeichnung des Ableitstromes (siehe Abbildung C.4) zeigt neben dem Verlust der Hydrophobie nach  $t = 500 \text{ h}$  keine weiteren Auffälligkeiten im Verlauf des maximalen Ableitstromes. Dementsprechend zeigt sich weder eine Verbesserung noch ein negativer Einfluss der mikrovaristorgefüllten Feldsteuerschicht. Dies ist daran begründet, dass sie zum einen nicht dick genug ist und zum anderen in einer derartigen Salznebelprüfung zu geringe Feldstärken auftreten, um das Material spürbar aussteuern zu können.

### 7.2.2. Salznebelversuch an Isolatoren mit $U_m = 170 \text{ kV}$

Nach der Norm [IEC 62217] müssen 1000-h-Versuche in einer Salznebelkammer zur Bauartprüfung nur an Modellisolatoren durchgeführt werden, sind aber auch

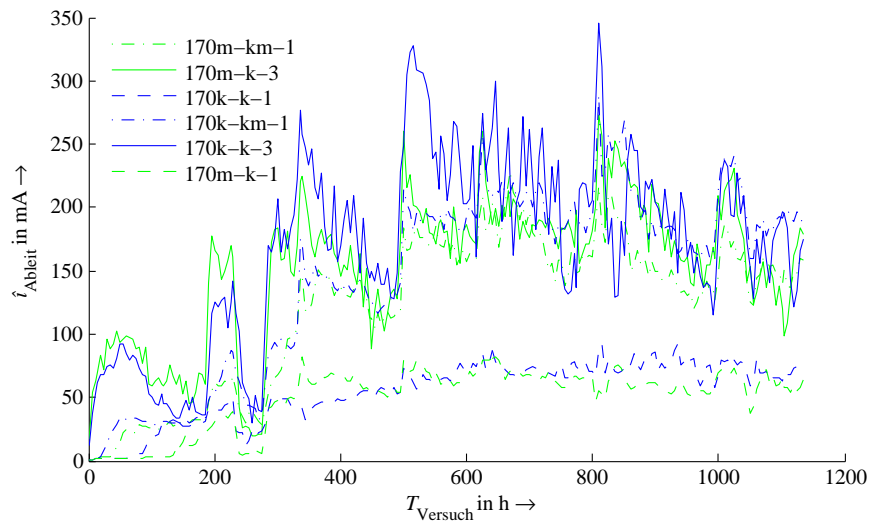


Abbildung 7.13.: Ergebnis des 1000-h-Versuchs an Verbundlangstabisolatoren mit  $U_m = 170 \text{ kV}$

an vollständigen Langstabisolatoren nicht unüblich. Es werden sechs Isolatoren stehend geprüft (siehe Abbildung B.12), so dass die Prüfspannung am oberen Ende angelegt werden muss. Das Prüfverfahren ist an der Norm angelehnt. Der Referenzisolator 170k-k wird mit einem Isolator mit mikrovaristorgefülltem Strunk 170m-k-1 verglichen. Die gefüllten Schirme der Isolatoren 170k-km-1 und 170m-km-1 werden hochspannungsseitig ausgerichtet. Die Isolatoren 170m-k-3 und 170k-k-3 sind mit einem reduzierten Kriechweg ausgestattet und werden so gezielt höher beansprucht. Die Prüfspannung wird aus dem Kriechweg  $l_k$  dividiert durch einen genormten Faktor berechnet und entspricht zufällig der Leitererdspannung  $U_{LE}$  der Isolatoren:

$$U_P = \frac{l_k}{34,6 \frac{\text{mm}}{\text{kV}}} = 98,3 \text{ kV} \quad (7.6)$$

Durch eine vorgeschriebene Salzmassenkonzentration  $m'_{\text{Salz}} = 8 \text{ kg/m}^3$  im Nebel wird dessen Leitfähigkeit eingestellt. Der Ableitstrom  $\hat{i}_{\text{Ableit}}$  entlang der Isolatoroberfläche wird zur weiteren Beurteilung während des Versuches gemessen, wenn er auch nach Norm nicht vorgeschrieben ist. **Abbildung 7.13** zeigt die Zusammenfassung der Ergebnisse. Eine generelle gegenseitige Beeinflussung der Ströme konnte nicht vermieden werden, die Tendenzen und Unterschiede sind aber klar zu erkennen. So zeichnet sich ab, dass die Höhe des Ableitstromes nicht direkt von der Verwendung von mikrovaristorgefüllten Silikonelementen abhängig ist. Vielmehr korrespondieren die Ergebnisse der Isolatoren mit unterschiedlichem Strunk aber jeweils gleicher Schirmkonfiguration. Die Isolatoren mit sieben konventionellen Schirmen zeigen gleich zu Beginn steigende Ströme, die offenkundig im zu kurzen

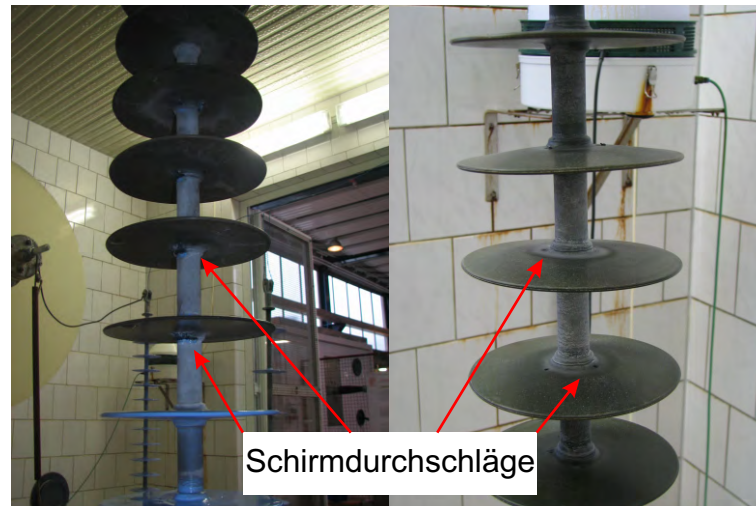


Abbildung 7.14.: Beispiel der durchgeschlagenen Schirme der Isolatoren mit  $U_m=170\text{ kV}$ . Auffällig ist, dass die Schäden nicht nur an der Nahtstelle zwischen dem Strunk und dem Schirm aufgetreten sind, sondern auch die Schirme direkt durchgeschlagen sind.

Kriechweg begründet sind. Der spätere, ebenfalls hohe Anstieg bei den Isolatoren 170m-km-1 und 170k-km-1 begründet sich durch die überwiegend durchgeschlagenen mikrovaristorgefüllten Schirme. Die Beschädigungen sind in **Abbildung 7.14** dargestellt. Neben einem verkürzten Kriechweg bedeuten diese Beschädigungen ein Nichtbestehen der Prüfung. Auffällig ist aber, dass nicht nur die Nahtstelle zwischen Schirm und Strunk durchgeschlagen ist, sondern auch Durchschläge über die Oberfläche der Schirme verteilt aufgetreten sind. Einzig die beiden Isolatoren 170k-k und 170m-k-1 weisen dauerhaft einen Ableitstrom  $\hat{i}_{\text{Ableit}} < 100\text{ mA}$  auf. Leitfähige Kriechspuren konnten bei keinem der Isolatoren festgestellt werden. Allerdings sind am Isolator 170m-k-3 erdseitig Erosionen bis auf den GFK-Stab aufgetreten, so dass dieser als durchgefallen zu werten ist. 170m-k-1 ist der einzige Isolator mit mikrovaristorgefüllten Silikonelementen, der die Prüfung bestanden hat. Die Beanspruchung des mikrovaristorgefüllten Silikons ist also in diesem Versuch höher, als in den Prüfungen der Modellisolatoren (siehe Abschnitt 7.2.1.4). Ergänzt durch die Untersuchungen mit dem Inclined-Plane-Test kann die direkte, ungeschützte Freilufteinsetzbarkeit des mikrovaristorgefüllten Silikons ausgeschlossen werden.

### 7.2.3. Beregnungsversuche an Verbundisolatoren mit $U_m = 420\text{ kV}$

Die Untersuchung des Verhaltens der mikrovaristorgefüllten Verbundisolatoren bei Wechselspannung und künstlicher Beregnung zeigt, ob sowohl die Unterdrückung von Wassertropfenkorona als auch die Vermeidung von Trockzonenüberschlägen möglich ist. Durchgeführt werden die Versuche in Anlehnung an [IEC 60060-1]. Eine

Prinzipdarstellung ist in **Abbildung 7.15** zu sehen.

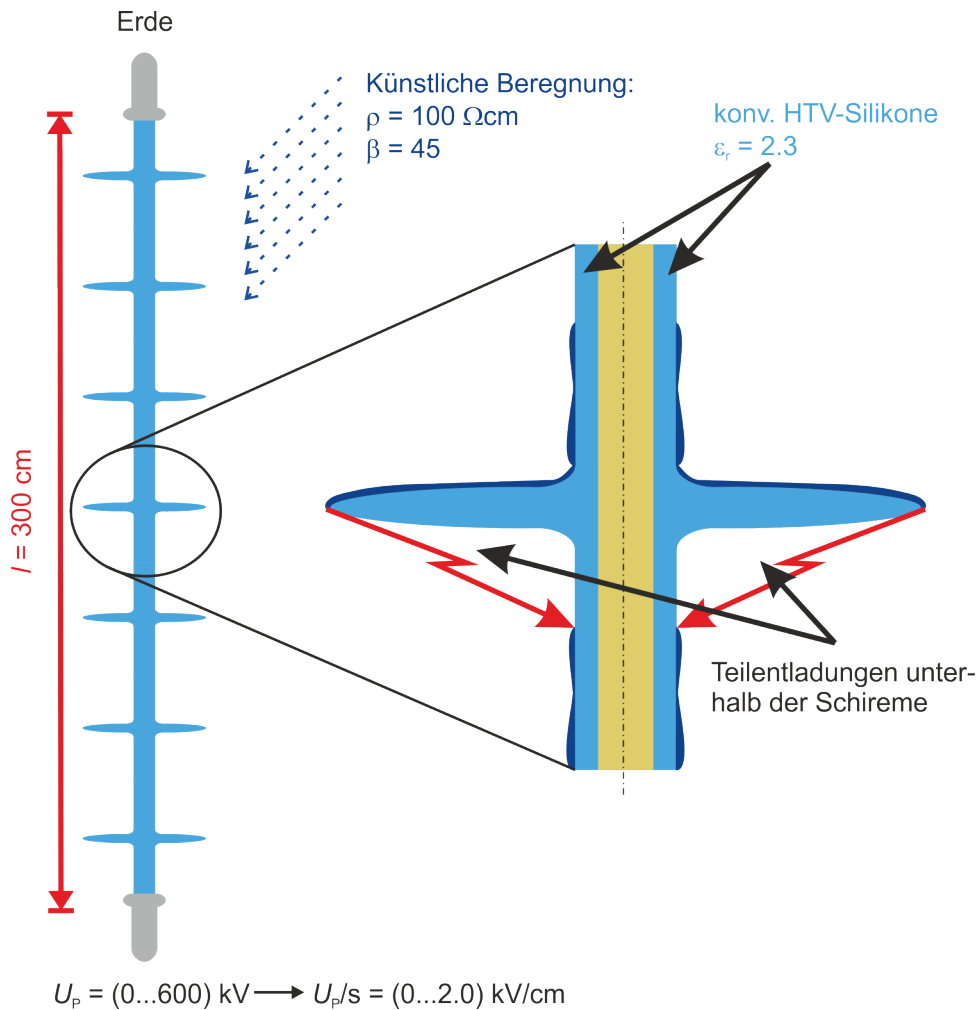


Abbildung 7.15.: Prinzipdarstellung der durchgeführten Beregnungsversuche

Entsprechend werden eine Leiterseilnachbildung als Hochspannungszuführung sowie eine erdseitige Traverse verwendet (siehe Abbildung B.7). Die kapazitive Schiefverteilung kann durch die Position im Laboratorium bzw. eine zusätzliche Mastnachbildung variiert werden und wird im Rahmen der Messungen der elektrischen Feldverteilungen in Abschnitt 7.3.3 erläutert. Schlechtere hydrophobe Eigenschaften konnten bei den mikrovaristorgefüllten Silikonelementen nicht festgestellt werden. Auch haben die Kleberrückstände der Montage sie nicht signifikant verändert (Details: Abbildung A.5). In einer ersten Versuchsreihe werden die Isolatoren 420m-mk, 420k-mk, 420k-k und 420m-k mit Spannungen bis zu  $U_p = 600 \text{ kV}$  geprüft. Der Aufbau dieser Isolatoren findet sich in **Abbildung 7.16**. Die Beobachtungen finden im abgedunkelten Laboratorium statt. Die Beregnung wird auf  $\beta \approx 45^\circ$  bei einer Regenmenge von  $m' = 1,81 \text{ l min/m}^2$  und einer Leitfähigkeit  $\sigma_{\text{Regen}} = 99,91 \text{ } \mu\text{S/cm}$  eingestellt. Ein exemplarisches Ergebnis für  $U_p = 420 \text{ kV}$  ist

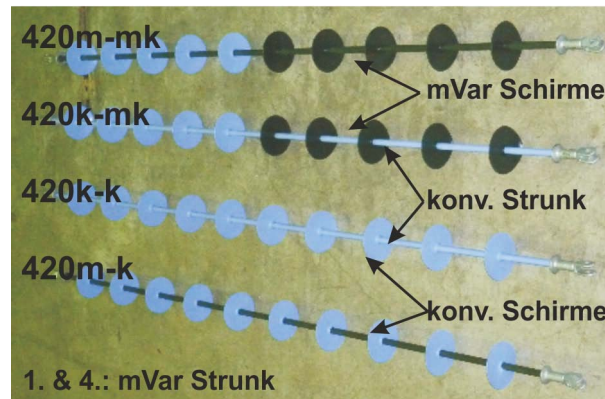


Abbildung 7.16.: Aufbau der geprüften 420 kV-Isolatoren

in **Abbildung 7.17** gezeigt.

Die Aufnahme wird im abgedunkelten Labor durchgeführt. Gut zu erkennen sind die Entladungen unter den vier hochspannungsseitigen Schirmen am konventionellen Isolator 420k-k. Ein deutlich verbessertes Verhalten zeigt Isolator 420m-k mit einem mikrovaristorgefüllten Strunk und konventionellen Schirmen. An ihm sind Entladungen nur unterhalb des ersten Schirms zu erkennen. Demgegenüber bewirken auch die einzelnen, hochspannungsseitig angebrachten mikrovaristorgefüllten Schirme des Isolators 420k-mk eine Reduzierung der Teilentladungen unterhalb von drei Schirmen. Das ist umso bemerkenswerter, da die mikrovaristorgefüllten Elemente keinen direkten Kontakt zu einer Armatur haben, was bedeutet, dass die mikrovaristorgefüllten Elemente durch ein externes Feld ausgesteuert werden und dieses dann begrenzen. Dies wird durch das in Abschnitt 7.2.1.1 entwickelte Modell bestätigt. Eine nahezu optimale Unterdrückung der Teilentladungen wird am Isolator 420m-mk erreicht, an dem mikrovaristorgefülltes Silikon an Strunk und Schirmen eingesetzt wird. Die mikrovaristorgefüllten Elemente sind also prinzipiell in der Lage, sich bildende Trockenzonen galvanisch zu überbrücken und somit den Einsatz von Entladungen zu verhindern. Ein entsprechendes Modell eines trockenen Bereiches unterhalb eines Schirms ist in **Abbildung 7.18** dargestellt. Die in Abschnitt 6.3.3 beschriebenen, nicht ausreichenden Freilufteigenschaften des mikrovaristorgefüllten Silikons haben sich während dieser Versuche an den Entladungszonen durch Erosionsspuren gezeigt.

Aufgrund der unzureichenden Freiluftbeständigkeit wird in einer weiteren Versuchsreihe ein doppeltextrudierter Strunk mit innen liegendem mikrovaristorgefülltem Silikon untersucht (siehe: **Abbildung 7.2**). Von der Schirmanzahl entspricht der Isolator 420DE den schon untersuchten Varianten 420m-mk und 420m-k (siehe Tabelle A.2). Um die Entladungsentwicklung besser erkennen zu können, ist bei diesem Versuch auf die Schirmringe verzichtet worden. Die Beregnungsmenge beträgt

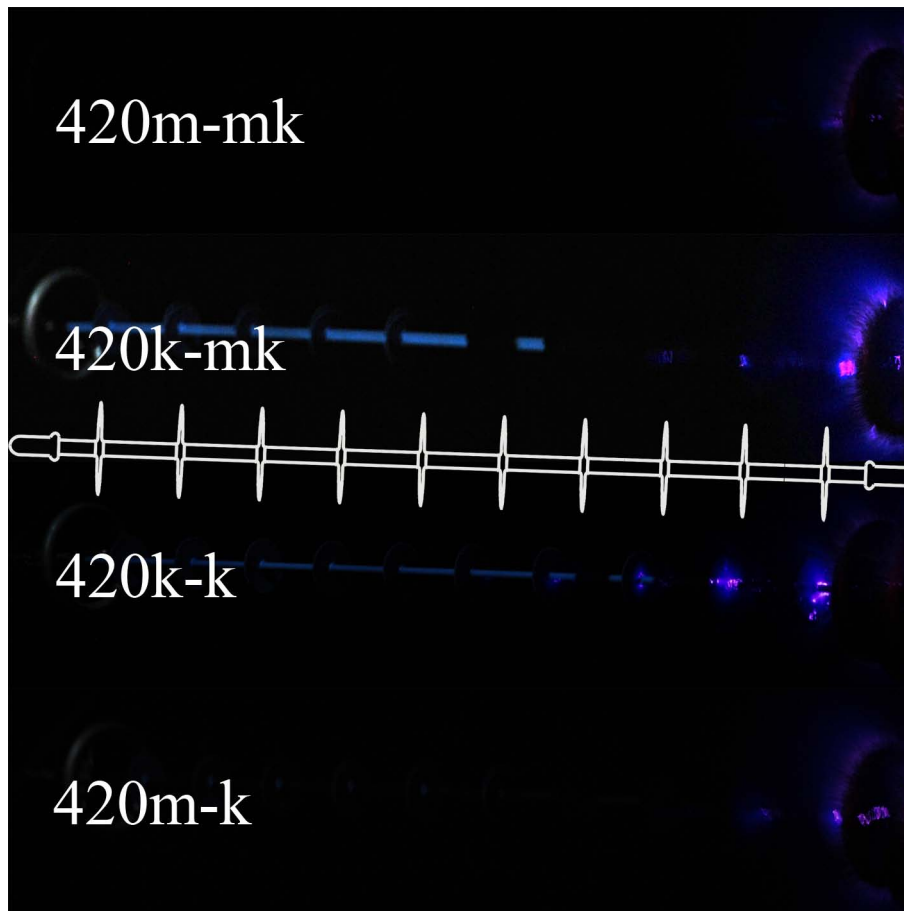


Abbildung 7.17.: Teilentladungsentwicklung an den Verbundisolatoren für  $U_m = 420 \text{ kV}$  exemplarisch bei einer Spannung von  $U = 420 \text{ kV}$ ; Bild  $90^\circ$  gedreht: Links befindet sich die obere Erdelektrode, rechts die untere Hochspannungselektrode

$m' = 2,01/(\text{min m}^2)$  mit einer Leitfähigkeit  $\sigma_{\text{Regen}} = 100 \mu\text{S}/\text{cm} (\pm 2 \%)$ . Die Isolatoren werden nach dem Aufbau in Abbildung B.7 mit einer Leiterseilhöhe  $h_L = 4,7 \text{ m}$  und einem Wandabstand zur nächstgelegenen geerdeten Wand  $d_W = 4,5 \text{ m}$  installiert. Die **Abbildung 7.19** zeigt ein exemplarisches Beispiel bei  $U_P = 600 \text{ kV}$ . Diesmal werden die Entladungen aber mit einer UV-Kamera (siehe Tabelle B.3) beobachtet. Diese erlaubt teilweise eine etwas bessere Lokalisierung der Entladungen, da das Labor nicht abgedunkelt werden muss. Dargestellt sind zudem zwei unterschiedliche Modi der Visualisierung der Entladungen. Sie sind unterschiedlich abgestimmt auf eine bessere Lokalisierung der Entladungen oder eine optimalere Einschätzung der Entladungsintensität. Wie zuvor beschrieben zeigt der Isolator 420m-k mit einem mikrovaristorgefüllten Strunk geringere Entladungsaktivitäten unter den ersten beiden Schirmen als der konventionelle 420m-mk. Allerdings sind die Unterschiede nicht so deutlich, wie das auf den Aufnahmen in Abbildung 7.17



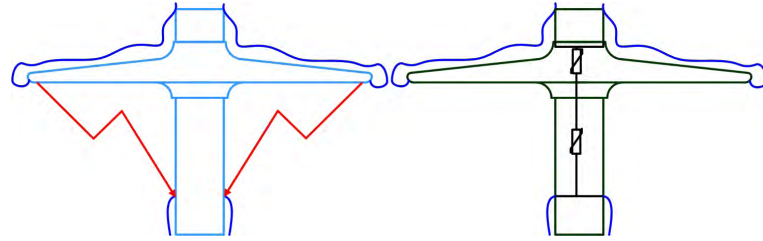


Abbildung 7.18.: Modell der galvanischen Überbrückung der Trockenstellen am berechneten Isolator durch mikrovaristorgefüllte Silikonelemente

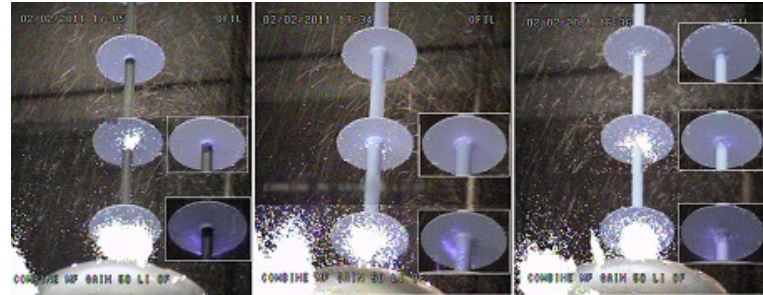


Abbildung 7.19.: Entladungsaktivität bei  $U_P = 600$  kV an den drei unteren Schirmen der Isolatoren: 420m-k (links), 420DE (mitte), 420m-mk (rechts). Die Aufnahmen wurden mit einer Tageslicht UV Kamera durchgeführt. Dargestellt sind zwei unterschiedliche Aufnahme Modi zur Lokalisierung bzw. besseren Abschätzung der Entladungsaktivität.

scheint. Besonders interessant ist dagegen der Isolator 420DE mit doppeltexturiertem Strunk, der ebenfalls eine leichte Verbesserung aufweist. Zu beachten ist aber, dass es sich nur um eine qualitative Momentaufnahme handelt, die nicht die absolute Ladungsmenge angibt. Eine genauere Bestimmung der Ladungsmenge ist aufgrund der Entladungen an Armaturen und Leiterseilnachbildung schwierig. Im Vergleich dazu sind dem Anhang die Entladungsentwicklungen, aufgenommen im abgedunkelten Labor, zu entnehmen (siehe Abbildung C.7, Abbildung C.8 und C.9).

Die Messungen zeigen, dass ein Schwellpunkt  $E_b = 1200$  kV/cm zu hoch liegt, um wirkungsvoll Entladungen auf einer äußeren Schicht zu unterdrücken. Abschließend wird daher eine weitere Variante, 420de-k-2, untersucht, die über einen geringeren Schwellpunkt  $E_b = 500$  kV/cm verfügt. Der Vergleich erfolgt mit einem konventionellen Isolator 420k-k-3 und einer Variante (420de-k-1) mit  $E_b = 1000$  kV/cm. Im Gegensatz zu den bisherigen Versuchen haben diese Isolatoren 34 Schirme. Der Aufbau entspricht Abbildung B.7 mit  $h_L = 4,7$  m und  $D_W = 4,5$  m. Die Entladungen werden wiederum im abgedunkelten Labor aufgenommen. Aufgrund der kürzeren Schirmabstände treten die Entladungen zwischen den Schirmen auf. Dagegen sind die Entladungen unterhalb der Schirme bei diesen Konfigurationen schwerer zu erkennen. In einer ersten Untersuchung mit angebrachten Steuerringen setzen

die Entladungen bei  $U_P = 500 \text{ kV}$  am Isolator 420de-k-1 und an den Isolatoren 420de-k-2 und 420k-k-3 bei  $U_P = 550 \text{ kV}$  jeweils zwischen dem ersten und dritten Schirm ein. Ein Teilüberschlag über mehrere Schirme ist zudem am konventionellen Isolator 420k-k-3 zu sehen. Dagegen setzen die Entladungen bei allen Isolatoren bei  $U_P = 400 \text{ kV}$  ein, wenn auf die Steuerringe verzichtet wird. Diese treten vor allem in der Tripel-Zone Armatur-Strunk auf. Am Isolator 420de-k-2 tritt zudem ein Teilüberschlag auf. Detailliertere Abbildungen sind in [Gie12] wiedergegeben.

### 7.2.4. Berechnungsversuche an Verbundisolatoren mit $U_m = 170 \text{ kV}$

An einem Isolator mit  $U_m = 170 \text{ kV}$  treten geringere elektrische Feldstärken auf als an einem der  $U_m = 420 \text{ kV}$ -Ebene. Zusätzlich kann bei dessen Abmessungen die Wirkung bei Gleichspannung untersucht werden. Die Einsatzmöglichkeiten von mikrovaristorgefüllten Elementen an Isolatoren mit einer geringeren Betriebsspannung  $U_m = 170 \text{ kV}$  werden zunächst mit den in Tabelle A.1 beschriebenen Isolatoren durchgeführt, die über die volle Anzahl von 17 Schirmen verfügen. An diesen können aber keine Trockenzonen während der Berechnung erzielt werden. Aus diesem Grund werden die Isolatoren 170k-k-3 und 170m-k-3 mit sieben Schirmen aufgebaut und unter einem größeren Winkel  $\beta = 60^\circ$  berechnet. Die Leitfähigkeit  $\sigma_{\text{Regen}} = 100 \mu\text{S/cm}$  und die Berechnungsmenge  $m' = 2,03 \text{ l min/m}^2$  werden nicht geändert. Bei einer Prüfspannung von  $U_P = 170 \text{ kV}$  setzen am konventionellen Isolator Entladungen ein. Ein Vergleich wird bei  $U_P = 300 \text{ kV}$  gezogen, hier sind unter den ersten drei Schirmen Entladungen zu sehen, die am Isolator 170m-k-3 mit mikrovaristorgefülltem Strunk deutlich reduziert sind.

Während bei Wechselspannung generell geometrische Steuerungen durch Steuerringe realisiert werden, können diese nicht bei Gleichspannungsanwendungen eingesetzt werden, so dass hier eine Steuerung mit den Leitfähigkeiten der äußeren Hüllen erfolgen muss. Aus diesem Grund wird zusätzlich das Verhalten der mikrovaristorgefüllten Isolatoren bei Gleichspannung berechnet untersucht. Verglichen wird wiederum die Einsetzspannung  $U_i$  der Entladungen der Isolatoren 170m-k-2 und 170k-k. Da keine kapazitiven Einflüsse zu berücksichtigen sind, wird ein vereinfachter Aufbau verwendet. Eine Einsetzspannung der Entladungen von  $U_{i,m\text{Var}} \approx 430 \text{ kV}$  am mikrovaristorgefüllten Isolator ist im Vergleich zum Referenzisolator deutlich höher,  $U_{i,konv} \approx 380 \text{ kV}$ . Eine praktische Bedeutung hat dieses Ergebnis nicht, da diese Spannung deutlich über der maximalen Betriebsspannung  $U_m = 170 \text{ kV}$  liegt. Es zeigt aber, dass an Isolatoren mit einem mikrovaristorgefüllten Strunk auch bei einer Gleichspannung lokal auftretende Wassertropfenkorona unterdrückt werden kann. Die verwendete galvanische Anbindung ist ebenfalls ausreichend.

Basierend auf den bisherigen Ergebnissen werden Isolatoren untersucht, deren



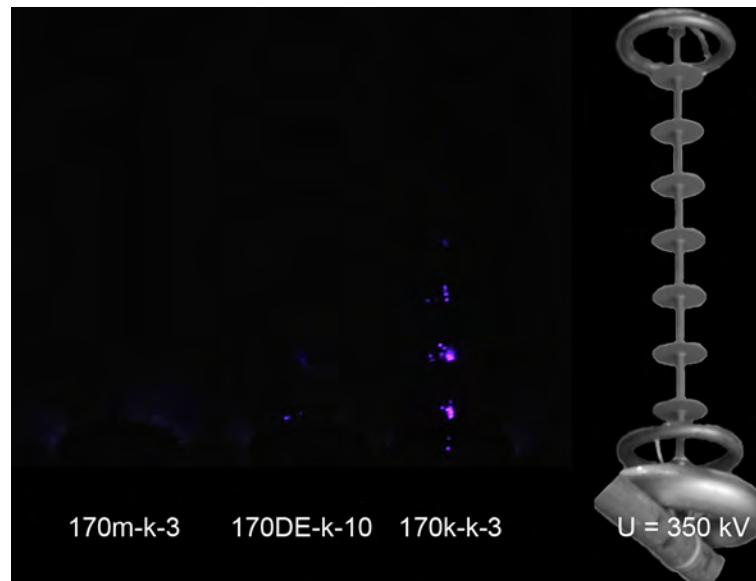


Abbildung 7.20.: Entladungsentwicklung berechnet und Wechselspannung an den Isolatoren 170k-k-3, 170m-k-3 und 170DE-k-1 bei  $U_p = 350 \text{ kV}$

mikrovaristorgefüllte Elemente durch ein konventionelles Silikon geschützt sind. Der Isolator 170DE-k-1 verfügt über einen doppeltexturierten Strunk, wie er in Abbildung 7.2 gezeigt ist. Die schon untersuchten Varianten 170k-k-3 und 170m-k-3 dienen als Vergleich. Die mikrovaristorgefüllten Silikonelemente verfügen bei beiden Isolatoren über den gleichen Schaltpunkt. Berechnet wird nach [IEC 60060-1] in einem Winkel von  $\beta = 45^\circ$ . Die Regenleitfähigkeit beträgt bei allen Versuchen  $\sigma_{\text{Regen}} = 100 \mu\text{S}/\text{cm} (\pm 2 \%)$  bei einer Regenmenge von  $m' = 1,88 \text{ l min}/\text{m}^2$ . Die Isolatoren sind nach dem Aufbau in Abbildung B.7 mit einer Leiterseilhöhe  $h_L = 4,7 \text{ m}$  und einem Wandabstand zur nächstgelegenen geerdeten Wand  $d_W = 4,5 \text{ m}$  installiert. Ein beispielhaftes Ergebnis ist in **Abbildung 7.20** wiedergegeben. Das Ergebnis des Isolators mit einem reinen mikrovaristorgefüllten Strunk, 170m-k-3, kann bestätigt werden, da keine Entladungen unterhalb der Schirme zu erkennen sind. Diese treten wiederum am konventionellen Isolator 170k-k-3 unterhalb der vier hochspannungsseitigen Schirme auf. Im Vergleich dazu ermöglicht der doppeltexturierte Strunk des Isolators 170DE-k-1 keine vollständige Unterdrückung der Entladungen. Deren Intensität ist allerdings im Vergleich zum konventionellen Isolator geringer und tritt nur unter den ersten drei Schirmen auf. Eine Ursache können konstruktive Unterschiede sein: Die Schirme verfügen im Gegensatz zu den anderen Isolatoren über einen größeren Neigungswinkel von  $\theta = 7^\circ$ , aufgrund dessen sich schlechter eine feuchte Schicht auf der Schirmoberseite bilden kann. Zusätzlich besteht kein galvanischer Kontakt zwischen mikrovaristorgefüllter Hülle und Armatur.. Das mikrovaristorgefüllte Material mit einem Schaltpunkt  $E_b = 1200 \text{ kV}/\text{cm}$  unter-

halb einer äußeren Silikonhülle kann Wassertropfenkorona also nicht wirkungsvoll unterdrücken.

Aus diesem Grund wird in einer abschließenden Versuchsreihe der Isolator 170de-k-1 untersucht, der über einen niedrigen Schaltspunkt  $E_b = 500 \text{ kV/cm}$  verfügt. 170DE-k-1 und 170m-k-2 der vorangegangenen Untersuchungen sowie der neue Isolator 170k-k-4 werden zusätzlich geprüft. Im Gegensatz zu den vorangegangenen Untersuchungen wird auf die Steuerringe verzichtet, um höhere Feldstärken an der Isolatoroberfläche zu erhalten. Die Entladungsentwicklung bei  $U_p = 325 \text{ kV}$  ist in **Abbildung 7.21** nach 12 min Belastung (15 min Beregnung) gezeigt. Bei den Isolatoren 170DE-k-1 und 170k-k-3 ist die Entladungsaktivität etwas geringer als beim konventionellen Isolator 170k-k-4. Eine deutlichere Entladungsunterdrückung zeigt sich am einfachextrudierten Isolator 170m-k-2. Ein weiteres Beispiel für  $U_p = 400 \text{ kV}$  ist in Abbildung C.10 gezeigt. Hier sind Entladungsaktivitäten nach 15 min-Belastung (15 min Beregnung) an den drei Isolatoren 170k-k-4, 170DE-k-1 und 170de-k-1 unter allen sieben Schirmen zu sehen. Lediglich der Isolator 170m-k-2 zeigt hier eine deutliche Entladungsunterdrückung.

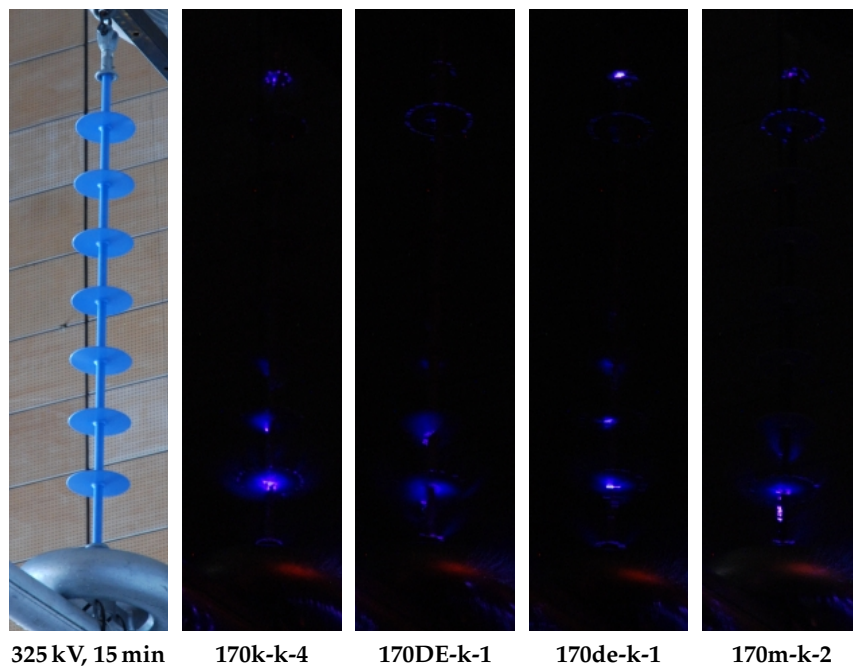


Abbildung 7.21.: Teilentladungen an Langstabisolatoren mit  $U_m = 170 \text{ kV}$ , Beregnungsdauer: 15 min,  $U_p = 325 \text{ kV}$  liegt nach 3 min an (Quelle: [Gie12]).

**7.2.5. Thermisches Verhalten der Verbundisolatoren mit  $U_m = 170 \text{ kV}$** 

Eine übermäßige Erwärmung eines Langstabisolators ist nicht zulässig (siehe Abschnitt 4.1). Eine entsprechende Überprüfung des Einflusses einer mikrovaristorgefüllten Silikonhülle bei Wechselspannung wird mit dem Isolator 170m-k-2 durchgeführt, der auf dem Laborboden aufgestellt und an der Oberseite an den Hochspannungstransformator angeschlossen wird. Die Beobachtung wird mit einer IR-Kamera durchgeführt, die die zeitliche Entwicklung an diskreten Punkten aufzeichnet. Zur Prüfung wird die dreifache Leiter-Erde-Spannung  $U_P = 3 \cdot U_{LE} = \sqrt{3}U_m = 325 \text{ kV}$  für  $t = 280 \text{ min}$  angelegt. Die maximale stationäre Temperaturerhöhung wird nach  $t \approx 90 \text{ min}$  erreicht und am hochspannungsseitigen Ende mit  $\Delta\theta \approx 5 \text{ K}$  gemessen. Der vollständige Temperaturverlauf ist in Abbildung C.11 im Anhang wiedergegeben. Diese geringfügige lokale Erwärmung des Isolators zeigt, dass das mikrovaristorgefüllte Silikon nur hochspannungsseitig leitfähig wird. Der ursächliche resistive Strom lässt sich auch durch einen erdseitig angebrachten Messshunt ( $R = 50 \text{ k}\Omega$ ) nicht bestimmen, was durch den im Vergleich zur bezogenen Spannung hohen Schaltpunkt des Isolators 170m-k-3 begründet ist:

$$\frac{U_P}{l_i} = \frac{300 \text{ kV}}{1320 \text{ mm}} = 227,3 \frac{\text{V}}{\text{mm}} \ll E_b = 1200 \frac{\text{V}}{\text{mm}} \quad (7.7)$$

Wie zuvor bei den Beregnungsversuchen in den Abschnitten 7.2.4 und 7.2.3 beschrieben, wird das Mikrovaristormaterial in diesem Fall nur lokal angesteuert. Die geringen Temperaturerhöhungen deuten an, dass sie nicht bei einem berechneten Versuch messbar sind.

**7.3. Wirkung als globale Feldsteuerung**

Für einen Verbundlangstabisolator stellt eine globale Feldsteuerung eine Linearisierung der Potentialverteilung längs der Isolatoroberfläche dar. Diese kann direkt durch Feldsonden gemessen werden. Ein Vergleich unterschiedlicher Anordnungen ist zudem durch die Bestimmung der Überschlagnspannungen bei Wechsel- und Stoßspannungen möglich. Sämtliche Überschlagnspannungen wurden auf Basis der atmosphärischen Umgebungsbedingungen korrigiert. Eine zusätzliche Mastnachbildung vergrößert den Einfluss der Erdkapazitäten auf die Potentialverteilung entlang des Isolators und führt daher zu einer leichten Linearisierung der Potentialverteilung entlang des Stabes während der Versuche im Labor. Für die Untersuchungen sind dagegen eher die hohen leiterseitigen elektrischen Feldstärken von Interesse. Dementsprechend wird auf eine Mastnachbildung verzichtet.

### 7.3.1. Untersuchung der Überschlagspannung bei Wechselspannung

Die Überschlagspannung bei Wechselspannung wird berechnet nach [IEC 60060-1] durch eine Steigerung der Spannung ermittelt. Geprüft werden Verbundlangstabisolatoren mit  $U_m = 170$  kV nach Tabelle A.1 und angebrachten Steuerringen. Entsprechend Abbildung B.8 ist die Leiterseilnachbildung im Labor  $h_L = 4,7$  m hoch und  $D_W = 4,5$  m von der Wand aufgebaut<sup>16</sup>. Die Ergebnisse sind in **Tabelle 7.8** zusammengestellt. Für die vorgestellten Konfigurationen kann kein Einfluss der unterschiedlichen mikrovaristorgefüllten Elemente auf die Überschlagspannung festgestellt werden. Insbesondere werden keine Vorentladungen bei der Steigerung der Spannung festgestellt. Da die Steuerringe einen Einfluss auf die elektrischen

Tabelle 7.8.: Mittlere Überschlagspannung  $U_{d50}$  bei Wechselspannung, berechnet der Isolatoren mit  $U_m = 170$  kV mit angebrachten Steuerringen

Isolator	170k-k	170m-k-2	170m-km-1	170k-km-1	170k-km-2
$U_{d50}$ in kV	436,6	433,3	432,8	430,4	430,3

Feldstärken haben, werden 170k-k und 170m-k-2 zusätzlich ohne Steuerringe geprüft. Aufgrund der vergrößerten Schlagweite sind die Ergebnisse im Vergleich zu Tabelle 7.8 höher, lassen aber mit  $U_{d,k} = 478,5$  kV und  $U_{d,m} = 482,7$  kV ebenfalls keine Unterschiede erkennen. Bei der Betrachtung der reinen Isolatorstäbe 170m und 170k ohne Schirme und Steuerringe können allerdings Unterschiede festgestellt werden. So zeigen sich zwar höhere Überschlagspannungen des mikrovaristorgefüllten Stabes mit  $U_{d,m} = 215,5$  kV und  $U_{d,k} = 202$  kV, die aber auf Grund von leitfähigen Kriechspuren am Strunk und zunehmend früher einsetzender TE mit steigender Versuchszahl abnimmt. Grundsätzlich deutet dies aber darauf hin, dass unter diesen Vorraussetzungen Feldstärken erreicht werden, bei denen das mikrovaristorgefüllte Silikon leitfähig wird.

In einer zweiten Versuchsreihe wird wiederum ein Isolator (170de-k-1) mit geringerem Schaltpunkt untersucht und mit den vorangegangenen Konfigurationen 170k-k-4, 170DE-k-1 und 170m-k-2 verglichen. Um eine signifikante Aussage über die Unterschiede treffen zu können, wird während der Prüfung auf die Steuerringe verzichtet. Im Vergleich zu Tabelle 7.8 sind deshalb höhere Überschlagspannungen zu erwarten. Vor Versuchsbeginn werden die Prüflinge für  $t = 20$  min berechnet. Um die Ergebnisse reproduzieren zu können, werden die Versuche an zwei Tagen wiederholt durchgeführt. Die Ergebnisse sind in **Tabelle 7.9** zusammengefasst. Die leichten Unterschiede zwischen den beiden Versuchstagen deuten hauptsächlich auf die statistischen Streuung. Bei 170DE-k-1 lässt sich zudem ein Einfluss durch Be-

---

<sup>16</sup>Eigenschaften Berechnung: Einfallswinkel  $\alpha \approx 45^\circ$  und  $\sigma = 100 \mu\text{S/cm}$

Tabelle 7.9.: Überschlagspannung bei Wechselspannung, berechnet der Isolatoren  
 $U_m = 170 \text{ kV}$  ohne angebrachte Steuerringe

Isolator		170k-k-4	170DE-k-1	170de-k-1	170m-k-2
Tag 1:	$U_d$ in kV	483,4	462,6	426,7	-
	$s$ in kV	14,11	26,9	30	-
Tag 2:	$U_d$ in kV	475,6	460,4	448,6	481,4
	$s$ in kV	17,71	12,69	23,06	17,29

schädigungen aus vorangegangenen Überschlagversuchen nicht ausschließen. Die Standardabweichung der einzelnen Versuche ist im Falle der mikrovaristorgefüllten Isolatoren aufgrund des Abfalls der Überschlagspannungen relativ hoch und deckt sich mit zunehmenden Teilentladungen während der einzelnen Überschlagversuche. Einzig beim Isolator 170m-k-2 führt diese TE nicht zu einer mit der Versuchszahl abnehmenden Überschlagspannung. Die Ergebnisse der beiden Versuchstage zeigen eine Reversibilität der Ergebnisse.

### 7.3.2. Stoßspannungsversuche

#### 7.3.2.1. Schaltstoßspannung

Zunächst werden Isolatoren der Spannungsebene  $U_m = 170 \text{ kV}$  mit Schaltstoßspannung trocken geprüft. Die Ergebnisse sind exemplarisch in **Tabelle 7.10** zusammengestellt. Wie zuvor bei den Wechselspannungsversuchen, sind auch hier keine Verbesserungen bzw. Verschlechterungen durch eine mikrovaristorgefüllte Silikonhülle zu erkennen. Einzig die Prüfung der  $l_i = 1600 \text{ mm}$  langen Strünke zeigt wiederum Unterschiede. So wird neben der statistischen Abhängigkeit der Überschlagspannung beim mikrovaristorgefüllten Prüfling mit  $\hat{u}_{d50} = 655,9 \text{ kV}$  eine im Vergleich zu einem konventionellen Strunk  $\hat{u}_{d50} = 691,1 \text{ kV}$  wesentlich geringere mittlere Überschlagspannung ermittelt. Für eine weitere Auswertung werden diese

Tabelle 7.10.: Überschlagspannung bei Schaltstoßspannung, trocken der Isolatoren  
 $U_m = 170 \text{ kV}$  in Abhängigkeit der Polarität und der verwendeten Steuerringe

	$\hat{u}_{d50, \text{pos}}$ in kV	$\hat{u}_{d50, \text{neg}}$ in kV	$\hat{u}_{d50, \text{pos}}$ in kV
	mit Steuerringen		ohne Steuerringe
170k-k	622,1	-911,2	711,4
170m-k-2	620,9	-889,6	705,7

Prüfungen mit künstlicher Beregnung und positiver Polarität wiederholt. Das Ergebnis ist in **Tabelle 7.11** zusammengefasst. Auch in diesem Fall lässt sich weder eine negative noch eine positive Beeinflussung durch die mikrovaristorgefüllten Polymere feststellen.

Tabelle 7.11.: Überschlagspannung bei Schaltstoßspannung, berechnet der Isolatoren mit  $U_m = 170$  kV mit und ohne Einsatz von Steuerringen

	mit Steuerringen		ohne Steuerringe	
	$\hat{u}_{d50,pos}$ in kV	$s$ in kV	$\hat{u}_{d50,pos}$ in kV	$s$ in kV
170k-k	627	14	667	24
170k-km-2	639	16	700	20
170k-km-1	624	12	684	27
170m-km-1	-	-	679	25
170m-km-2	-	-	693	22
170m-km-1 gedreht	-	-	656	15
170k-km-1 gedreht	-	-	660	21
170m-k-1	-	-	673	20
170m	-	-	628	20
170k	-	-	617	15

Die Isolatoren 420k-k-3, 420de-k-1 und 420de-k-2 für  $U_m = 420$  kV werden trocken nach dem Steigerungsverfahren (Klasse 3) nach [IEC 60060-1] mit  $n = 10$  Versuchen positiver Polarität geprüft. Die Isolatoren werden mit  $h_L = 9$  m und  $d_W = 6,7$  m aufgehängt und mit Schirmringen montiert. Durch beide Maßnahmen können störende Überschläge in die Wand des Laboratoriums vermieden werden. Die Ergebnisse sind in **Tabelle 7.12** zusammengefasst. Ein signifikanter Unterschied

Tabelle 7.12.: Ergebnisse der Schaltstoßspannungsprüfung mit drei Isolatoren, trocken für  $U_m = 420$  kV

Isolator	$\hat{u}_{d50,pos}$ in kV	$s$ in kV	$E_b$ in V/mm
420k-k-3	1254	40	/
420de-k-1	1203	25	1200
420de-k-2	1183	58	500

zwischen den einzelnen Isolatoren ist nicht zu erkennen, da die Abweichungen auch zwischen 420k-k-3 und 420de-k-2 mit 6 % zu gering sind, um einen negativen

Einfluss des geringeren Schaltpunktes erkennen zu können. Zudem ist die Anzahl der durchgeführten Versuche relativ gering. Eine statistische Abhängigkeit der einzelnen Versuche kann bei keinem der Isolatoren festgestellt werden.

### 7.3.2.2. Blitzstoßspannung

In einer Versuchsreihe mit genormter positiver Blitzstoßspannung  $1,2/50 \mu\text{s}$  werden Langstabisolatoren mit  $U_m = 420 \text{ kV}$  geprüft. Verwendet wird ein zu Abbildung B.8 analoger Aufbau. Die angegebenen Ergebnisse sind um die atmosphärischen Bedingungen korrigiert. Die Leiterseilnachbildung ist  $h_L = 7,1 \text{ m}$  hoch und  $d_W = 4,1 \text{ m}$  von der geerdeten Wand entfernt installiert. Zunächst werden die Isolatoren 420k-k und 420m-k auf ihre Bemessungsblitzstoßspannung mit angebrachten Schirmringen nach [IEC 60071-1] geprüft. Beide Isolatoren haben  $\hat{u}_{\text{BIL}} = 1425 \text{ kV}$  bei den  $n = 15$  geforderten Stoßspannungen sowie 10 zusätzliche Stöße gehalten und somit die Normvorgaben erfüllt. Für die weiteren Versuche mit den Isolatoren 420k-k, 420m-k und 420m-mk sowie den Strünken 420k und 420m wird das Steigerungsverfahren nach [IEC 60060-1] verwendet. Dieses Verfahren ermöglicht nicht nur die Bestimmung der mittleren Überschlagspannung  $\hat{u}_{\text{d50}}$  und der Standardabweichung  $s$ , sondern auch den Rückschluss auf eine eventuell vorhandene statistische Abhängigkeit von der Versuchsanzahl. Gleichzeitig werden die Prüflinge möglichst wenigen Überschlägen ausgesetzt. Die Versuche werden zunächst ohne und im Anschluss mit Steuerringen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in **Tabelle 7.13** zusammengefasst.

Tabelle 7.13.: Überschlagspannung bei Blitzstoßspannung, trocken der Isolatoren  $U_m = 420 \text{ kV}$  in Abhängigkeit der verwendeten Steuerringe

	$\hat{u}_{\text{d50, pos}}$ in kV	$s$ in kV	$\hat{u}_{\text{d50, pos}}$ in kV	$s$ in kV
	mit Steuerringen		ohne Steuerringe	
420k-k	1630	10	1770	10
420m-k	1630	10	1610	60
420m-mk	-	-	1590	30
420k	1630	10	1700	10
420m	1580	10	1560	30

Bei den Versuchen ohne Steuerringe sind deutliche Unterschiede der Überschlagspannung  $\hat{u}_{\text{d50, pos}}$  zu sehen. Sie ist sowohl bei den beiden Isolatoren mit mikrovaristorgefüllten Elementen, 420m-k und 420m-mk, als auch dem mikrovaristorgefüllten Strunk 420m deutlich geringer, als bei den konventionellen Varianten 420k-k und 420k. Beispiele für die beobachteten Überschläge sind in **Abbildung 7.22** gezeigt.

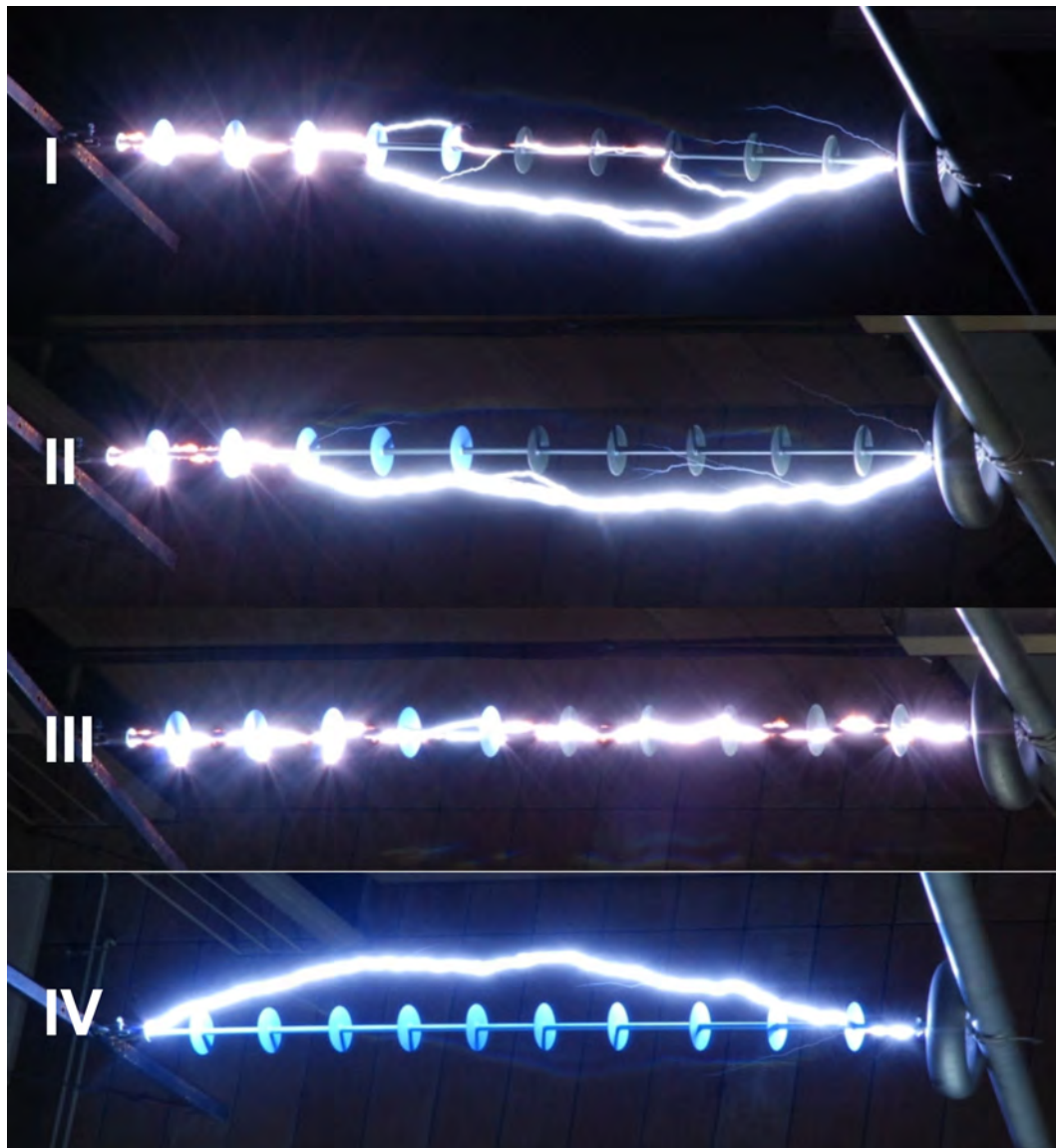


Abbildung 7.22.: Vergleich der Überschlge bei Blitzstoßspannung des Isolators 420m-mk (Bild I-III) mit dem konventionellen Isolator 420k-k (Bild IV). Beide Isolatoren ohne Steuerringe



Die Entladungen werden förmlich von den mikrovaristorgefüllten Strünken geführt. Dementsprechend sind Spuren der Überschlüge am kompletten Strunk von 420m zu sehen. Ein Einfluss des Materials ist also deutlich zu erkennen. Nach einer Reinigung werden die Versuche mit zusätzlichen Steuerringen an den Isolatoren 420k-k, 420m-k, 420k und 420m wiederholt. Deutliche Unterschiede der Überschlagspannung zwischen den einzelnen Isolatoren sind allerdings nicht zu erkennen. Das heißt, ein Einfluss des mikrovaristorgefüllten Silikons ist mit Steuerringen nicht erkennbar.

In einer abschließenden Versuchsreihe wird der Einfluss des Schaltpunktes mit den Isolatoren 420k-k-3, 420de-k-1 und 420de-k-2 ohne Steuerringe im Steigerungsverfahren mit  $n = 10$  Versuchen geprüft. Der Aufbau erfolgt analog mit  $h_L = 7$  m und  $d_W = 6,7$  m. Die Ergebnisse sind in **Tabelle 7.14** zusammengefasst. Zwischen

Tabelle 7.14.: Ergebnisse der zweiten Blitzstossspannungsprüfung mit drei Isolatoren für  $U_m = 420$  kV, ohne Schirmringe und trocken.

Isolator	$\hat{u}_{d50}$ in kV	$s$ in kV	$E_b$ in V/mm
420k-k-3	1873	24	-
420de-k-1	1867	25	1200
420de-k-2	1807	26	500

den Isolatoren 420k-k-3 und 420de-k-1 ist kein Unterschied der mittleren Überschlagspannung  $\hat{u}_{d50}$  zu erkennen. Die 3 % geringere Überschlagspannung beim Isolator 420de-k-2 stellt dabei keine signifikante Reduktion dar. Eine statistische Abhängigkeit kann wiederum nicht festgestellt werden. Somit kann kein Einfluss des Schaltpunktes  $E_b$  festgestellt werden. Gleichzeitig sinkt die Spannung nicht ab, da es sich um doppeltextrierte Strünke handelt.

### 7.3.3. Messung der elektrischen Feldverteilungen

Aus der Messung der elektrischen Feldstärke mit einer Feldsonde entlang des Langstabes lässt sich der Einfluss der mikrovaristorgefüllten Silikonelemente auf deren Verteilung ableiten. Diese wird an den Isolatoren 420k-k, 420m-k und 420DE im Aufbau nach Abbildung B.7 mit  $d_W = 5,3$  m und  $h_L = 3,2$  m untersucht. Die Feldsonde EFA 300<sup>17</sup> misst die elektrische Feldstärke kapazitiv in x-, y, und z-Richtung und bildet deren Betrag. Aufgrund der Kantenlänge  $l_{EFA} = 10$  cm kann nicht davon ausgegangen werden, dass die Sonde ohne Beeinflussung der Feldverteilung lokale Effekte aufzeichnen kann. Sie wird mit dem Abstand  $d_{Mess} = 77,5$  cm am Isolator

<sup>17</sup>Herzlichen Dank dem Institut Hochspannungstechnik und Elektrische Energieanlagen der TU Braunschweig für die Leihgabe

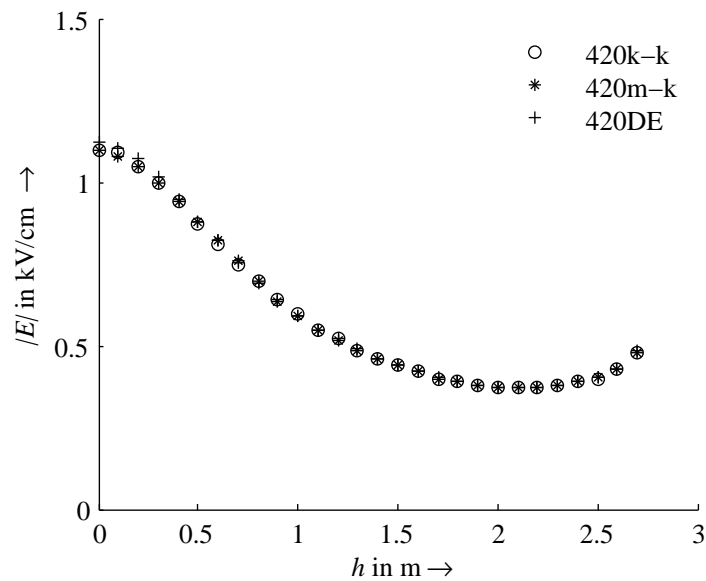


Abbildung 7.23.: Verteilung der elektrischen Feldstärke  $|E|$  gemessen entlang der Isolatoren 420k-k, 420m-k und 420DE mit einem Abstand  $d_{\text{Mess}} = 77,5 \text{ cm}$  bei  $U_P = 303 \text{ kV}$

entlang geführt. Die Prüfungen werden bei  $U_P = 243 \text{ kV}$  und  $U_P = 303 \text{ kV}$  durchgeführt. Der relativ große Abstand  $d_{\text{Mess}}$  und die geringe Prüfspannung sind in der maximalen Belastbarkeit  $E_{\text{max}} = 1 \text{ kV/cm}$  der Sonde begründet. Für  $U_P = 303 \text{ kV}$  ist in **Abbildung 7.23** der Verlauf des Betrages der elektrischen Feldstärke beginnend an der Leiterseilnachbildung dargestellt. Die mikrovaristorgefüllte Schicht der beiden Isolatoren 420m-k und 420DE verfügt über einen Schaltpunkt von  $E_b = 10 \text{ kV/cm}$ . Es ergibt sich der typische Verlauf einer Schiefverteilung, die im Einfluss der Erdkapazitäten begründet ist. Eine Beeinflussungsmöglichkeit auf die elektrische Feldstärke im Raum um den Isolator durch das mikrovaristorgefüllte Silikon ist nicht zu erkennen. Weitere Untersuchungen führen zu dem gleichen Resultat und zeigen lediglich den Einfluss der räumlichen Installation -  $d_W$  und  $h_L$  - im Labor. Dokumentiert sind sie in [Ack11]. Durch die Messung der elektrischen Feldstärke können die Ergebnisse der Stoßspannungsversuche dahingehend bestätigt werden, dass durch eine mikrovaristorgefüllte Silikonschicht keine globale Feldsteuerung an einem Verbundisolator möglich ist. Eine Untersuchung der lokalen Feldsteuerung könnte als Fortführung mit einem Pockelssensor durchgeführt werden, wie er in Kapitel 8.2.1 verwendet wird.

## 7.4. Fazit der Anwendungsmöglichkeiten mikrovaristorgefüllter Silikonelemente an Verbundisolatoren

Bei den in der vorliegenden Arbeit vorgestellten Versuchen handelt es sich um die erstmalige experimentelle Untersuchung von Verbundlangstabisolatoren mit mikrovaristorgefüllten Silikonelementen. Dabei konnten sowohl unterschiedliche Schaltpunkte als auch eine große Anzahl an konstruktiven Varianten untersucht werden. Mit einem Strunk aus mikrovaristorgefülltem Silikon kann Wassertropfenkorona auf der Oberfläche eines Isolators wirkungsvoll unterdrückt werden. Als Ursache wird gezeigt, dass diese Komponenten auf Grund ihrer stark nichtlinearen Kennlinie auch nur lokal am Isolator leitfähig werden können und damit elektrische Feldstärken begrenzen. So werden gleichzeitig zu hohe thermische Belastungen vermieden durch einen global fließenden Strom vermieden. Aufgrund der schlechten Freiluftbeständigkeit des gefüllten Silikons können mikrovaristorgefüllte Silikone nicht als einzige Beschichtung eines Verbundisolators verwendet werden. Als Anwendung können doppeltextrierte Strünke eingesetzt werden, an denen die mikrovaristorgefüllte Silikonschicht durch einen zusätzlichen Mantel aus einem konventionellen Silikon geschützt wird. Basierend auf diesem Prinzip wurde mikrovaristorgefülltes Silikon mit den Schaltpunkten  $E_b = 1200 \text{ V/mm}$  und  $E_b = 500 \text{ V/mm}$  verwendet. Mit beiden Varianten sind Verbesserungen in den Beregnungsversuchen zu erkennen, die aber nicht so deutlich wie beim unbeschichteten mikrovaristorgefüllten Silikon ausfallen. Die Konsequenz der dieser Ergebnisse ist, dass für eine Anwendung ein niedriger Schaltpunkt und eine Schichtdicke von  $a = 3 \text{ mm}$  notwendig ist. Sie deuten im Weiteren darauf hin, dass auch Trockenzoneüberschläge durch mikrovaristorgefüllte Silikone verringert werden können. Allerdings stehen entsprechende Prüfungen noch aus.

Eine Beeinflussung der Potentialverteilung entlang eines Langstabes durch ein mikrovaristorgefülltes Silikon ist dagegen nicht möglich. Gerade durch Messungen mit einer Feldsonde EFA-300 konnte dies gezeigt werden. Feldsonden dieser Art sind aber nur in Grenzen einsetzbar, da sie sowohl zu groß sind, um rückwirkungsfrei messen zu können, als auch über einen zu geringen Messbereich verfügen. Lediglich bei hohen Blitzstoßspannungen werden Feldstärken erreicht, die größere Bereiche des Isolators aussteuern und zur unerwünschten Absenkung der mittleren Überschlagspannung führen können. Die doppeltextrierten Isolatoren haben diesen Effekt nicht gezeigt.

Reine mikrovaristorgefüllte Schirme haben dagegen die Laborprüfungen nicht bestanden, da sie sowohl in den Salznebelversuchen als auch bei den Blitzstoßprüfungen durchgeschlagen sind. Sie können daher nicht als Ergänzung der doppeltex-

trudierten Strünke eingesetzt werden.

Das Langzeitverhalten von Verbundisolatoren mit mikrovaristorgefüllten Silikon-elementen muss noch geprüft werden. Neben ersten realisierten Feldversuchen (siehe [SF13]) sind dafür besonders Fremdschichtprüfungen notwendig.

## 8. Endenglimmschutz rotierender elektrischer Maschinen

### 8.1. Übersicht der eingesetzten Wicklungsstabmodelle

Die Funktionalität des mikrovaristorgefüllten EGS wird auf Wicklungsstabmodellen untersucht, die aus einem Eisenprofil und einer VPI-Isolation bestehen, auf welcher der geerdete AGS angebracht ist. Aufgebaut wurden die Prüflinge durch die Firma Von Roll Insulation. Die Isolationsdicke von  $a_{\text{Iso}} = 3,5 \text{ mm}$  ist für eine Nennspannung von  $U_n = 16 \text{ kV}$  ausgelegt. Die Abmessungen der Modelle  $l \times b \times h : 900 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$  ermöglichen sowohl sehr gut die Messung der Potential- und Feldverläufe entlang der Oberfläche als auch eine thermografische Untersuchung der Systeme. Auf dieser Anordnung werden die unterschiedlichen Varianten des Endenglimmschutzes untersucht, der jeweils den AGS um  $l_{\text{ül}} = 20 \text{ mm}$  überlappt. Die Lacke entsprechen den in Abschnitt 6.5 beschriebenen Lacken auf Phenolharzbasis. Als Beispiele werden in **Abbildung 8.1** die Wicklungsstabmodelle 240-mVar mit einem mikrovaristorgefüllten Lack und 240-SiC mit konventionellem System auf SiC-Basis gezeigt. Variiert wird bei beiden Systemen jeweils die Länge des Anstrichs<sup>18</sup>. Die aufgebauten Stäbe sind in **Tabelle 8.1** zusammengefasst. Mikrovaristorgefüllte Lacke mit einem höheren Schaltpunkt als  $E_b = 500 \text{ V/mm}$  werden aufgrund der Erfahrungen, die mit den Verbundlangstabisolatoren (siehe Kapitel 7) gemacht worden sind, nicht betrachtet. Der Endenglimmschutzlack ist mit einer Dicke  $a_{\text{EGS}} = 150 \mu\text{m}$  auf dem Wicklungsstabmodell aufgetragen. Geht man von einem mittleren Durchmesser von  $D_{50} = 90 \mu\text{m}$  der Mikrovaristoren aus, folgt

Tabelle 8.1.: Übersicht der untersuchten Wicklungsstabmodelle mit unterschiedlich langem Anstrich des jeweiligen Lackes

Typ	Länge in mm
ZnO 500 V/mm	80, 145, 165 und 240
SiC	80, 145, 165 und 240

<sup>18</sup>Die Bezeichnung der Modelle setzt sich aus der Länge des Anstrichs und dem verwendeten Lacksystem zusammen



Abbildung 8.1.: Beispiel zweier Stabmodelle 240-mVar und 240-SiC sowie die Festlegung des Ursprunges für die vorgestellten Messungen

daraus, dass die Lackschicht aus zwei bis drei Lagen Mikrovaristoren besteht, die lange, dünne Ketten bilden. Aufgrund des Spannungsfalls zwischen zwei Partikeln steigt der Widerstand überproportional mit zunehmender Länge der Lackschicht. Dies hat den Vorteil, dass die Verluste begrenzt werden, allerdings kann ein Einfluss auf die Potentialverteilung und deren Messung nicht ausgeschlossen werden. Neben der Bestimmung der Potential- und Temperaturverteilungen an der Oberfläche des Endenglimmschutzsystems werden die Einsetzspannungen von Glimmentladungen in Abhängigkeit der Länge des EGS angegeben. Die Überschlagspannung, z.B. bei Stoßspannung, wird nicht bestimmt, da eine Beschädigung der nur in begrenzter Anzahl vorhandenen Modellstäbe dabei nicht vermieden werden kann.

## 8.2. Untersuchung der Feld- und Potentialverläufe von Endenglimmschutzsystemen

### 8.2.1. Messung

Der Verlauf des Oberflächenpotentials  $\Phi_s$  bzw. der tangentiellen elektrischen Feldstärke  $E_t \approx \frac{d\phi_s}{dx}$  entlang des Endenglimmschutzanstrichs ist das entscheidende Beurteilungskriterium für dessen Wirksamkeit. Für die Messung der Potentialverteilung werden ein Starke-Schröder-Voltmeter (SSV) (siehe Tabelle B.2, [Sta32]) sowie eine aktive elektrostatische Feldsonde TREK 341B (siehe Tabelle B.1) verwendet. Das SSV leitet das elektrische Potential aus der elektrostatischen Kraft nach  $F \propto U^2$  ab und misst damit den Effektivwert der Spannung. Die Anzeige erfolgt optisch auf einer kalibrierten Messskala<sup>19</sup>. Die Sonde des elektrostatischen Voltmeters TREK 341B wird im Gegensatz dazu auf das Oberflächenpotential abgeglichen. Aufgrund der Limitierung  $\hat{u}_{\max} = U_{DC} = 20 \text{ kV}$  des Gerätes ist nur eine Messung bis  $U_P = U_n / \sqrt{3} = 9,2 \text{ kV}$  möglich. Die Tastspitze und die Sonde der beiden Messgeräte werden mit Hilfe eines Linearantriebes entlang der Oberfläche automatisiert geführt. Während das SSV eine Messung mit direkter Kontaktierung der Oberfläche

---

<sup>19</sup>Nach dem Abgleich mit einem kalibrierten Messsystem erlaubt das SSV reproduzierbare Messungen an Hochspannungsleitern/-elektroden.

ermöglicht, muss beim TREK ein Messabstand  $d_{\text{Mess}} = 5 \text{ mm}$  eingehalten werden, was zu einer Begrenzung der räumlichen Auflösung an der Oberfläche führt. Die Aufzeichnung der Potential- und Feldverläufe beginnt am Ende der Überlappung von AGS und EGS. Zunächst wird in **Abbildung 8.2** der Vergleich der beiden Messgeräte an den Modellstäben 240-mVar und 240-SiC bei  $U_p = 9,2 \text{ kV}$  gezeigt. Die Messung mit dem TREK 341B bildet den Potentialverlauf erwartungsgemäß ab. Das im Punkt  $s = 0 \text{ cm}$  gemessene Potential  $\phi \neq 0 \text{ V}$  ist auf den durch  $d_{\text{Mess}}$  verursachten Messfehler zurückzuführen. Das ist deshalb problematisch, weil am Übergang des AGS auf den EGS die maximale Feldstärke auftritt, die so nicht exakt bestimmt werden kann.

Die mit dem SSV gemessenen Verläufe weichen qualitativ und quantitativ erheblich von denen mit dem TREK aufgenommen ab. Die relativ hohe Messabweichung ist in der hohen Eigenkapazität  $C_{\text{SSV}} = 2\text{--}5 \text{ pF}$  des Gerätes begründet, die bei der Messung parallel zum Oberflächenwiderstand des EGS liegt. Aus diesem Grund kann das SSV nur bei den Messpunkten am Beginn des EGS als hochohmiges Voltmeter angesehen werden. Die Kapazität  $C_{\text{SSV}}$  liegt parallel zum Oberflächenwiderstand und bildet mit der Kapazität der Isolation  $C_{\text{Iso}}$  einen kapazitiven Spannungsteiler, der das Potential am Messpunkt auf der Oberfläche senkt [Kem09]. Unterschiedliche Lacke können so im Bereich des Maximums der Potentialverläufe nur sehr schwer verglichen werden, da sich die kapazitive Verkopplung in Abhängigkeit des Oberflächenwiderstandes des jeweiligen Lackes ändert. Das SSV wird aber für den Vergleich herangezogen, da zum einen im relevanten Übergangsbereich noch Aussagen über die auftretenden Feldstärken gemacht werden können und zum anderen Messungen auch mit höheren Prüfspannungen problemlos möglich sind.

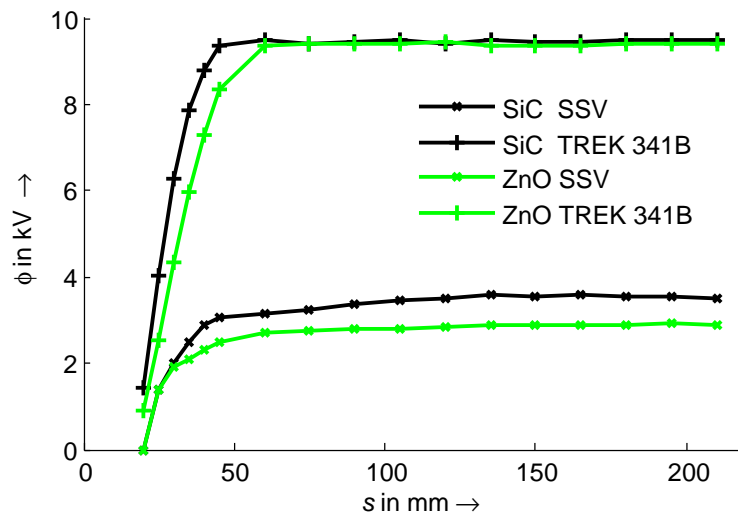


Abbildung 8.2.: Vergleich der Messung mit dem SSV und dem TREK 341B bei einer Spannung von  $U_p = 9,2 \text{ kV}$

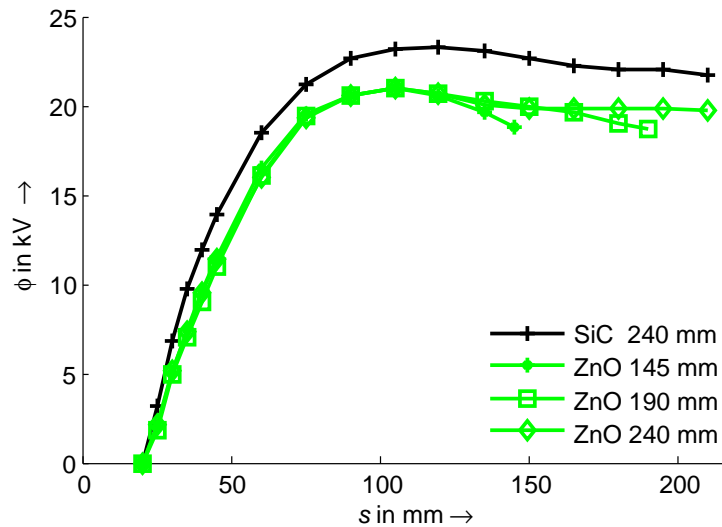


Abbildung 8.3.: Vergleich des Oberflächenpotentials an der Oberfläche der Modellstäbe 240-SiC, 240-mVar, 145-mVar und 165-mVar bei  $U_P = 32$  kV. Die Messung ist mit dem SSV durchgeführt worden

Die Verläufe in Abbildung 8.2 zeigen aber auch, dass die Lacke noch nicht leitfähig werden und somit das elektrische Feld nicht steuern. Daher treten bei Betriebsspannung auch keine unzulässigen Verluste auf, und der mikrovaristorgefüllte Lack unterdrückt genauso gut wie der konventionelle Lack Teilentladungen. Erst mit zunehmenden Prüfspannungen werden die Lacke leitfähig. Ein Beispiel einer solchen Steigerung ist im Anhang in Abbildung C.12 am Beispiel des Modellstabes 240-mVar zu sehen.

Die Fähigkeit, resistiv zu steuern, wird bei doppelter Nennspannung  $U_P = 32$  kV in **Abbildung 8.3** gezeigt. Es werden die beiden Modellstäbe 240-mVar und 240-SiC verglichen sowie mit den Modellen 145-mVar und 165-mVar eine Variation der Länge des mikrovaristorgefüllten Anstriches durchgeführt. Das für resistive Steuerungen charakteristische Überspringen des Potentials (siehe Abschnitt 2.2.3.2) ist aufgrund des höheren Nichtlinearitätsexponenten  $\alpha$  beim mikrovaristorgefüllten Lack kürzer als beim konventionellen Äquivalent [Kel67a] [Kel67b]. Negative Folgen in Form von Feldüberhöhungen hat dieses Überspringen aber nicht. Die Länge des Anstrichs zeigt in diesen Versuchen keinen Einfluss auf die Ergebnisse. Sie ist in allen Fällen unnötig groß. Die notwendige Länge  $\delta$  einer solchen resistiven Steuerung lässt sich nach Gleichung 2.18 abschätzen:

$$\delta = \frac{U_P}{E_b} = \frac{32 \text{ kV}}{500 \text{ V/mm}} = 64 \text{ mm} \quad (8.1)$$

$$(8.2)$$



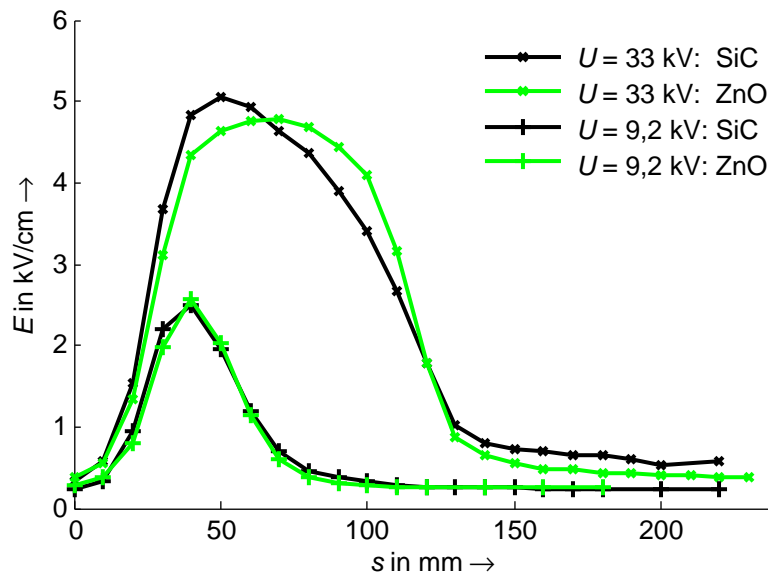


Abbildung 8.4.: Vergleich der auftretenden elektrischen Feldstärke an den Stäben 240-mVar und 240-SiC bei einer Spannung von  $U = 9,2 \text{ kV}$  und  $U = 33 \text{ kV}$

Einschließlich der  $l_{\text{ül}} = 20 \text{ mm}$  großen Überlappung ergibt sich damit eine minimal notwendige Länge von  $l = 84 \text{ mm}$  für den mikrovaristorgefüllten Endenglimmschutzanstrich. Teilentladungen können bei der Prüfspannung  $U_P = 32 \text{ kV}$  an keiner der in diesem Versuch betrachteten Varianten festgestellt werden (siehe Abschnitt 8.4).

Da sich aus den gemessenen Potentialverteilungen des SSV auf Grund der genannten Gründe nur bedingt elektrische Feldstärken ableiten lassen, wird zusätzlich die Verteilung der elektrischen Feldstärke mit Hilfe eines Pockelsensors mit dem in Abbildung B.18 dargestellten Versuchsstand durchgeführt<sup>20</sup> [Mer07]. Neben der direkten Messung des tangentialen elektrischen Feldes  $E_t$  an der Oberfläche des Stabes hat der Sensor den Vorteil, dass er keine metallischen Komponenten in das zu messende Feld einbringt, sondern nur durch den hochpermittiven Kristall Rückwirkungen auf das elektrische Feld hat [Mer07]. Die Untersuchungen werden an den Modellstäben 240-mVar und 240-SiC bei  $U_P = 9,2 \text{ kV}$  und  $U_P = 33 \text{ kV}$  durchgeführt und sind in **Abbildung 8.4** dargestellt. An beiden Stäben wird die Feldstärke beginnend am EGS mittig, im Abstand von  $d_{\text{Mess}} = 8 \text{ mm}$  gemessen. Die gemessenen Verläufe des elektrischen Feldes bei  $U_P = 9,2 \text{ kV}$  sind nahezu identisch, da die Lacke bei anliegender Nennspannung noch nicht leitfähig werden. Das heißt, auch der mikrovaristorgefüllte Lack ist bei Nennspannung einsetzbar. Die

<sup>20</sup>Die Messungen konnten am Lehrstuhl für Hochspannungstechnik der TU Dortmund durchgeführt werden. Besonderer Dank gilt Hrn. Dipl.-Wirt.-Ing. Rolf Schmerling für die freundliche Unterstützung.

Ergebnisse bei  $U_P = 33 \text{ kV}$  bestätigen die Messungen des elektrischen Potentials. Mit  $E_{\max} = 4,8 \text{ kV/mm}$  reduziert der mikrovaristorgefüllte Lack die elektrische Feldstärke etwas mehr als der SiC-gefüllte EGS mit einer maximalen Feldstärke von  $E_{\max} = 5,1 \text{ kV/mm}$ . Auffällig ist zudem der qualitative Unterschied der beiden Feldverläufe. So ist die elektrische Feldstärke bei 240-mVar am Ende der Überlappung zwar geringer, nimmt dann aber einen signifikant anderen Verlauf. Es bildet sich eine Art Plateau der elektrischen Feldstärke, das im hohen Nichtlinearitätsexponenten der Mikrovaristoren begründet ist, die die anliegende Feldstärke schärfer begrenzt. Dagegen fällt die elektrische Feldstärke am Stab 240-SiC schneller ab, d.h. für die Steuerung wird eine kürze EGS-Schicht benötigt. Diese Länge ist von der elektrischen Feldstärke abhängig, auf die begrenzt werden soll. Sie entspricht dem Schaltpunkt (siehe Gleichung 2.18). Beide Effekte können durch Simulationsrechnungen bestätigt werden (siehe Abschnitt 8.2.2). Der Pockelssensor kann allerdings nur in einer Richtung, hier in tangentialer Richtung, die elektrische Feldstärke messen. Dementsprechend besteht ebenfalls eine Abhängigkeit von der Messdistanz  $d_{\text{Mess}}$  sowie der Position über der Oberfläche. Gleichzeitig werden Feldüberhöhungen an der Kante der Stäbe aus diesem Grund nicht aufgezeichnet. Beide Aspekte können Abbildung C.13 im Anhang entnommen werden. Höhere Prüfspannungen können aufgrund von an den Messsonden einsetzenden Teilentladungen weder mit dem SSV noch mit dem Pockelssensor durchgeführt werden. Aus diesem Grund werden diese bei den thermografischen Untersuchungen in Abschnitt 8.3 berücksichtigt.

### 8.2.2. Simulation mikrovaristorgefüllter Endenglimmschutzsysteme

Rechnergestützte Simulationen der Wicklungsstabmodelle dienen der Validierung der Messergebnisse und können der Auslegung eines mikrovaristorgefüllten Endenglimmschutzsystems dienen. Die in [Wei10] beschriebenen Ergebnisse aus Simulationsrechnungen sind im Rahmen des gleichen Projektes entstanden wie die vorliegende Arbeit. Zusammengefasst sind die gerechneten Potential- und Feldverläufe in Abbildung 4.8. Da nicht die geometrisch gleichen Modelle betrachtet werden konnten, ist eine Validierung nur teilweise möglich. Der Vergleich der Potentialverläufe ist schwierig, da sie aufgrund der Rückwirkung der Messgeräte stark fehlerbehaftet sind und somit nur im Übergang AGS/EGS durchgeführt werden können. Gut zu erkennen und zum Beispiel mit Abbildung 8.3 vergleichbar ist das unterschiedlich stark ausgeprägte Überspringen, das beim mikrovaristorgefüllten Endenglimmschutzsystem deutlich kürzer ist. Dagegen sind die qualitativen Unterschiede der Verläufe der tangentialen elektrischen Feldstärke auffällig, wie sie zwischen den Abbildungen 4.8 und 8.4 zu erkennen sind. So zeigt sich in der Simulation am mikrovaristorgefüllten Endenglimmschutz eine im Vergleich zu dem SiC System höhere tangentiale Feldstärke, was aber den Messungen widerspricht.

Zusätzlich ist auch der qualitative Verlauf ein anderer, da die Bereiche des EGS-Anstrichs, in denen das jeweilige System leitfähig wird, sich ebenfalls umgekehrt verhalten. Der gemessene Verlauf in Abbildung 8.4 wird aber auch durch die folgenden thermografischen Untersuchungen bestätigt. Aus diesem Grund werden die Untersuchungen durch alternative Simulationen mit der Software Ansoft Simplorer<sup>21</sup> durchgeführt. Diese erlaubt die Nachbildung der Endenglimmschutzsysteme durch diskrete Elemente, was bedeutet, dass die Berechnung auf Basis eines Kettenleiters nach Abbildung 2.1 durchgeführt wird. Ein solches Modell wird zum Beispiel in [Riv99] und [Kau08] verwendet. Auf Basis dessen werden die einzelnen Elemente eines Wicklungsstabmodells nach Abbildung 8.1 bestimmt. Dementsprechend wird der gleiche Ursprung  $s = 0$  mm für die Abszisse verwendet, der auch bei den Messungen definiert worden ist.

Zunächst werden in **Abbildung 8.5** unterschiedliche Längen des mikrovaristorgefüllten Endenglimmschutz simuliert. Bestätigt werden können die theoretischen

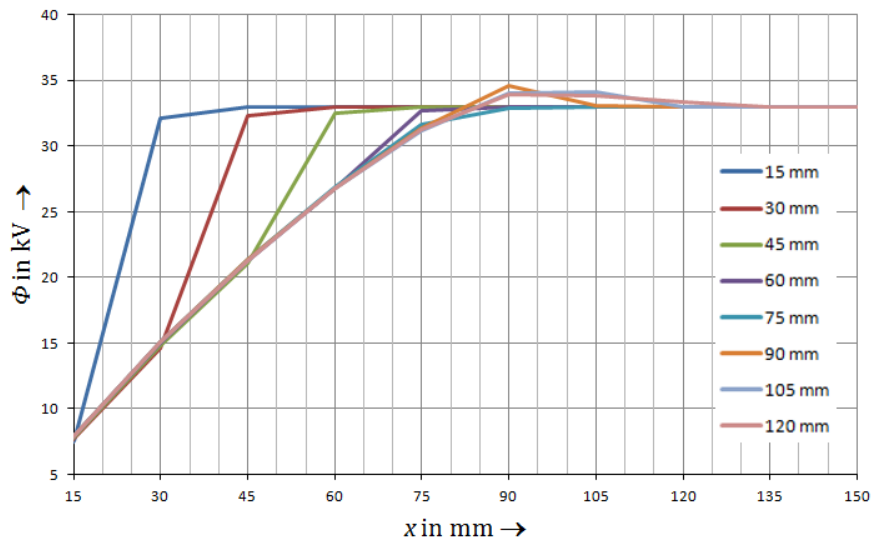


Abbildung 8.5.: Simulation unterschiedlicher Längen des mikrovaristorgefüllten Endenglimmschutzes mit  $E_b = 500$  V/mm bei einer Spannung  $U_p = 33$  kV[Jäg12]

Überlegungen nach Gleichung 8.2 für die minimal notwendige Länge, die sich hier zu  $l = 70$  mm ergibt. Zudem ist das für resistive Steuerungen typische Überspringen zu erkennen, dass aus einer Phasenverschiebung zwischen anliegender Spannung und Oberflächenpotential resultiert. Interessant werden Simulationsrechnungen aber erst, wenn sie genutzt werden, Isolationssysteme zu optimieren. Für ein Endenglimmschutzsystem kann das eine Anpassung der nichtlinearen  $E$ - $J$ -Kennlinie sein. Als erste Näherung wird auf Basis des Systems mit  $E_b = 500$  V/mm

<sup>21</sup> Ansoft Simplorer ist ein Softwaretool der Firma ANSYS: [www.ansys.com](http://www.ansys.com)

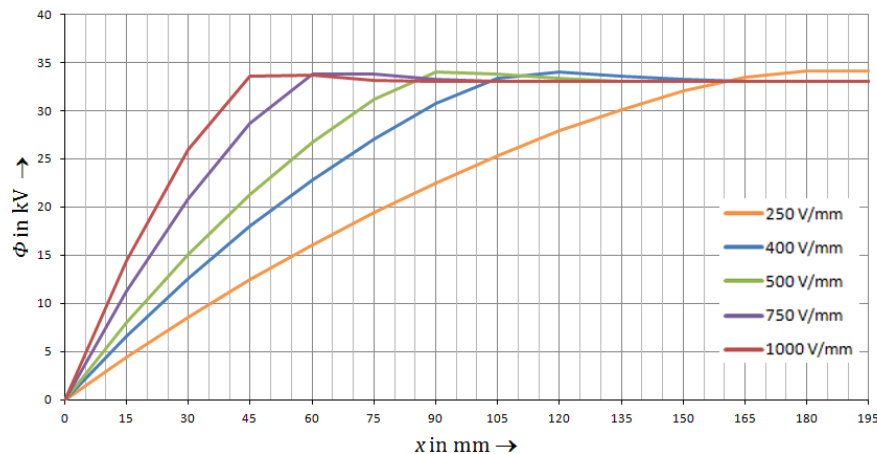


Abbildung 8.6.: Simulation unterschiedlicher Schaltpunkte  $E_b$  des mikrovaristorgefüllten Endenglimmschutzes bei einer Spannung  $U_P = 33 \text{ kV}$  [Jäg12]

eine Variation durch Multiplikation mit unterschiedlichen Faktoren verwendet. Die angepassten  $U$ - $I$ -Kennlinien mit den abgeschätzten Schaltpunkten  $E_b = 250 \text{ V/mm}$ ,  $400 \text{ V/mm}$ ,  $500 \text{ V/mm}$ ,  $740 \text{ V/mm}$  und  $1000 \text{ V/mm}$  sind in Abbildung C.16 wiedergegeben. Auf deren Basis erfolgt nun die Simulation wie zuvor und ist als Ergebnis in **Abbildung 8.6** dargestellt. Die Simulation veranschaulicht, dass mit einem geringeren Schaltpunkt ein längerer Anstrich notwendig wird, was auch aus Gleichung 8.2 ersichtlich ist. Generell folgt aus den Ergebnissen, dass ein höherer Schaltpunkt als  $E_b = 500 \text{ V/mm}$  nicht verwendet werden sollte, da dann nicht von einer ausreichenden Steuerung der elektrischen Feldstärke ausgegangen werden kann. Niedrigere Schaltpunkte führen zwar zu geringeren elektrischen Feldstärken, können aber höhere thermische Verluste verursachen. Notwendig sind diese geringeren elektrischen Feldstärken allerdings nicht. Abschließend wird der simulative Vergleich zwischen einem mikrovaristorgefüllten und einem konventionellen Endenglimmschutzsystem in **Abbildung 8.7** gezogen. Die Simulation entspricht den Messungen in Abbildung 8.2 und 8.3. Sie zeigt allerdings keine wesentlichen Unterschiede zwischen den beiden Lacksystemen. Dies bestätigt, dass gerade bei den Messungen mit dem SSV die großen Unterschiede tatsächlich im Messverfahren selbst begründet sind. Zu erkennen ist zudem der prinzipielle Unterschied im Überspringen der beiden Lacke, der sich in dessen Länge widerspiegelt und schon beschrieben wurde. Die Erwärmung aufgrund der Verluste in den Endenglimmschutzsystemen wurde in diesem Modell nicht berücksichtigt. Gerade bei den geringeren Schaltpunkten in Abbildung 8.6 kann aber nicht ausgeschlossen werden, dass das Material zu leitfähig wird. Für die Betrachtung dieser Aspekte muss die  $E$ - $J$ -Kennlinie des Kettenleitermodelles um die Temperaturabhängigkeit erweitert

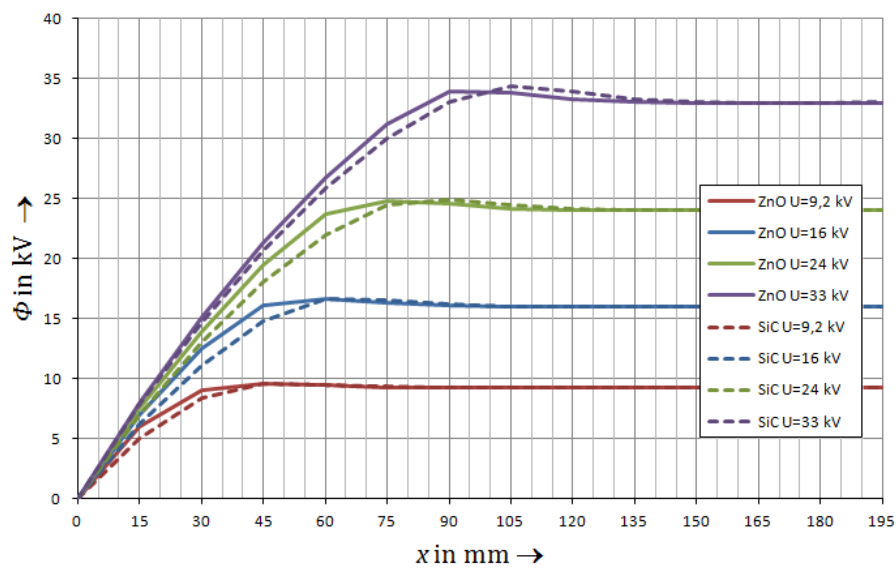


Abbildung 8.7.: Vergleich des mikrovaristorgefüllten Endenglimmschutzes ( $E_b = 500 \text{ V/mm}$ ) mit einem SiC-gefüllten System in Abhängigkeit der Spannung [Jäg12]

werden.

### 8.2.3. Bewertung der Messverfahren

Zunächst sollen die Messverfahren bewertet und deren Aussagemöglichkeiten dargestellt werden. Eine Zusammenfassung ist in **Tabelle 8.2** wiedergegeben. Das

Tabelle 8.2.: Vergleich der Messverfahren zur Untersuchung Endenglimmschutzsysteme.

	SSV	TREK 341B	Pockelssensor
<b>Messgröße</b>	$\Phi_S$	$\Phi_S$	$E_{\tan}$
<b>Messbereich</b>	+	-	/
<b>Ortsauflösung</b>	+	-	+
<b>Rückwirkung</b>	-	0	+

elektrostatische Voltmeter TREK 341B eignet sich nicht für die Untersuchungen der Modellstäbe, da aufgrund der maximalen Spannung mit  $U_{DC} = 20 \text{ kV}$  nur Messungen bei Nennspannung möglich sind. Auch wenn das SSV für die Messungen des Oberflächenpotentials nur eingeschränkt nutzbar ist, da es nicht mehr als hochohmiges Messgerät angesehen werden kann, erlaubt es doch den Rückschluss auf zwei Eigenschaften. Zum einen kann am Übergang vom Außenglimmschutz auf

den Endenglimmschutz auf das anliegende elektrische Feld geschlossen werden, und zum anderen kann die benötigte Länge des EGS abgeschätzt werden. So ist auch nur im Bereich des Übergangs der Vergleich unterschiedlicher EGS-Systeme möglich. Letztere Eigenschaft ist aufgrund der Simulationstechniken nicht mehr notwendig. Der Pockelsensor zeichnet sich durch seine räumliche Auflösung sowie seine geringe Rückwirkung aus. Nachteilig ist allerdings der relativ geringe Messbereich.

Eine Alternative zur Beurteilung der resistiven Systeme stellen moderne Infrarotkameras dar. Diese erlauben aufgrund der Temperaturverteilung einen Rückschluss auf die Potentialverteilungen, ohne dass eine Messung einen Einfluss ausübt. Ebenso kann die thermische Stabilität nachgewiesen werden. Aufgrund der erreichbaren hohen Auflösungen können u.U. sogar Fehlstellen erkannt werden.

### **8.3. Thermisches Verhalten resistiver Endenglimmschutzsysteme**

Thermografische Aufnahmen bieten im Gegensatz zu den Potential- und Feldmessungen die Möglichkeit einer rückwirkungsfreien Untersuchung der unterschiedlichen Endenglimmschutzsysteme. Aus diesem Grund bieten sie sich zur Validierung der in Abschnitt 8.2 durchgeführten Untersuchungen an und werden an gleichen Wicklungsstabmodellen durchgeführt. Besonders der direkte Vergleich zweier unterschiedlicher feldsteuernder Systeme ist ein großer Vorteil dieser Methode. In der vorliegenden Arbeit werden zwei unterschiedliche Infrarotkamera-Systeme verwendet. Die überwiegende Zahl der Untersuchungen wird mit einer IR Kamera (FLIR Thermocam PM 695 siehe Tabelle B.5 [FLI01]) durchgeführt. Erweitert werden die Versuche durch ein zweites System (Infratec VariaoCAM hr head siehe Tabelle B.6), das leihweise zur Verfügung stand. Ziele der durchgeführten Untersuchungen sind:

- Aufzeichnung von Temperaturprofilen an der Oberfläche des EGS
- Validierung der Potentialmessungen
- Untersuchung der thermischen Stabilität bei erhöhter Prüfspannung

Neben diesen Vorteilen bieten die thermografischen Aufnahmen die Möglichkeit, Untersuchungen zur Stabilität des Systems durchzuführen. Diese Versuche können kurzzeitig für einige Stunden oder langfristig für mehrere Tagen oder Wochen durchgeführt werden. Auch wenn die direkte Aussage der Infrarot (IR)-Aufnahmen nur die Oberflächentemperatur des Prüflings umfasst, kann aus ihr direkt auf das Verhalten des Endenglimmschutzsystems geschlossen werden, da es sich um sehr

dünne Schichten handelt. Um mit der Thermographie genaue Oberflächentemperaturen messen zu können, muss das Emissionsverhalten der Prüfobjekte bekannt sein. Dies wird durch einen Emissionskoeffizienten berücksichtigt. Für die untersuchten Endenglimmschutzsysteme werden im Folgenden die in **Tabelle 8.3** angegebenen Emissionskoeffizienten verwendet. Diese werden experimentell ermittelt, indem eine Vergleichsmessung der Lackprobe mit einer schwarz markierten Probe gleicher Temperatur durchgeführt wird. Um den Einfluss der Umgebungstemperatur beurteilen zu können, ist diese im Prüflabor regelbar ( $\delta T \approx \pm 1^\circ \text{C}$ ). Die Prüfstäbe werden nicht zusätzlich geheizt. Sie werden horizontal an einem geerdeten Gerüst nach Abbildung B.17 montiert. An diesem können die Modellstäbe sowohl einzeln als auch parallel untersucht werden. Die Messdistanzen betragen  $d_{\text{Mess}} = 2\text{--}3\text{ m}$  und werden versuchsabhängig spezifiziert.

Tabelle 8.3.: Experimentell ermittelte Emissionskoeffizienten der untersuchten Endenglimmschutzsysteme

EGS-Typ	Emissionskonstante
SiC	0,9
ZnO	0,95

In einem ersten Versuch wird die kurzfristige Erwärmung an den Wicklungsstäben 240-mVar und 240-SiC nach Anlegen der Prüfspannung  $U_P = 2 \cdot U_n + 1\text{ kV} = 33\text{ kV}$  untersucht. Prüfspannung und -zeit sind der Stehwechselspannungsprüfung nach [IEC 60034-1] entlehnt. Die Prüflinge werden zunächst einzeln im Aufbau B.17 geprüft. Die Temperatur wird für  $t = 3\text{ min}$  alle 10 s mit der IR-Kamera aufgezeichnet. Aus diesen Daten heraus werden Profile der Oberflächentemperatur abgeleitet. Diese ermöglichen, analog zu den Potentialverteilungen, Aussagen zum Verhalten der Endenglimmschutzsysteme. **Abbildung 8.8** zeigt den SiC-gefüllten EGS. Nach  $t = 1\text{ min}$  wird eine maximale Temperatur von  $T = 42^\circ \text{C}$  erreicht. Im Vergleich dazu ist in **Abbildung 8.9** der mikrovaristorgefüllte EGS gezeigt, der sich auf  $T = 43^\circ \text{C}$  aufheizt. Die Systeme erwärmen sich also ähnlich schnell, aber das mikrovaristorgefüllte System erwärmt sich über einen größeren Bereich der EGS-Oberfläche. Der Grund liegt im hohen Nichtlinearitätsexponenten der Mikrovaristoren.

Dieser Aspekt wird in einer weiteren Versuchsreihe mit einer erhöhten Prüfspannung  $U_P = 40\text{ kV}$  für eine längere Prüfzeit  $t = 180\text{ min}$  untersucht. Gleichzeitig wird ein alternatives Messsystem vom Typ *VarioCAM hr head* (siehe Tabelle B.6)<sup>22</sup> eingesetzt, das aufgrund der höheren räumlichen Auflösung verwendet wird.

<sup>22</sup>Das IR Kamerasystema konnte freundlicherweise von der Fakultät für Elektrotechnik und Informatik der Hochschule Zittau/Görlitz ausgeliehen werden. Ein besonderer Dank Frau Dipl.Ing.(FH) Christiane Bär und Herrn Dipl.-Ing. (FH) Rüdiger Cervinka für die Unterstützung

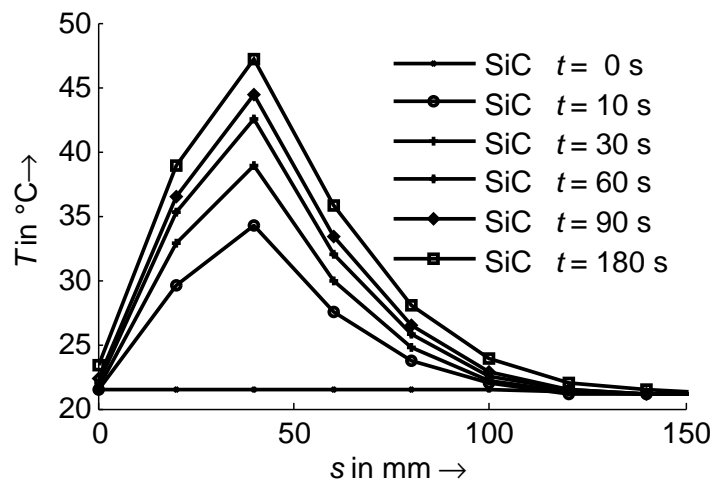


Abbildung 8.8.: Zeitabhängige Erwärmung des SiC-gefüllten EGS des Stabes 240-SiC nach dem Anlegen der Prüfspannung  $U_P = 33 \text{ kV}$ . Die Aufnahmen erfolgten mit der Kamera der Marke Flir.

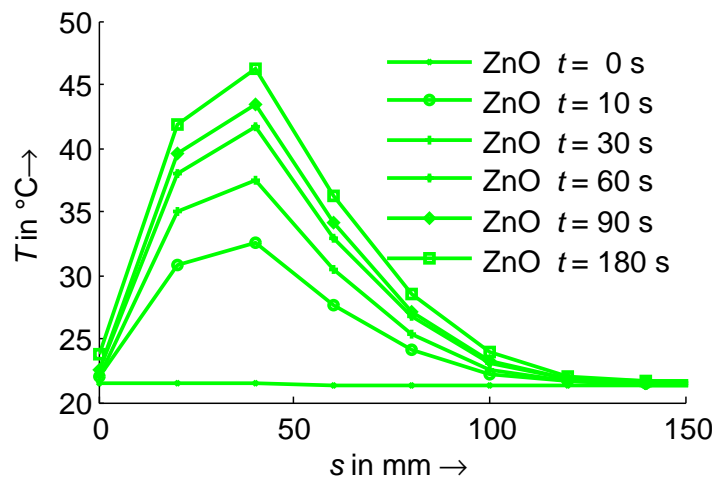


Abbildung 8.9.: Zeitabhängige Erwärmung des ZnO-gefüllten EGS des Stabes 240-mVar nach dem Anlegen der Prüfspannung  $U_P = 33 \text{ kV}$ . Die Aufnahmen erfolgten mit der Kamera der Marke Flir.

Die Prüfung wird bei  $T_{\text{amb}} = 30^\circ\text{C}$  und einer Messdistanz der IR-Kamera von  $d_{\text{Mess}} = 2,25 \text{ m}$  durchgeführt. Zusätzlich werden die beiden unterschiedlichen EGS der Stäbe parallel unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Emissionskoeffizienten nach Tabelle 8.3 betrachtet. Die Auswertung der Temperaturprofile erfolgt analog aus den aufgenommenen Infrarotaufnahmen. Das Ergebnis ist in **Abbildung 8.10** zusammengefasst. Neben den absolut höheren Temperaturen zeigen sich die eigentlichen Effekte der unterschiedlichen nichtlinearen Widerstände. So treten am Wicklungsstab mit dem SiC-gefülltem EGS nicht nur die höheren Temperaturen auf,



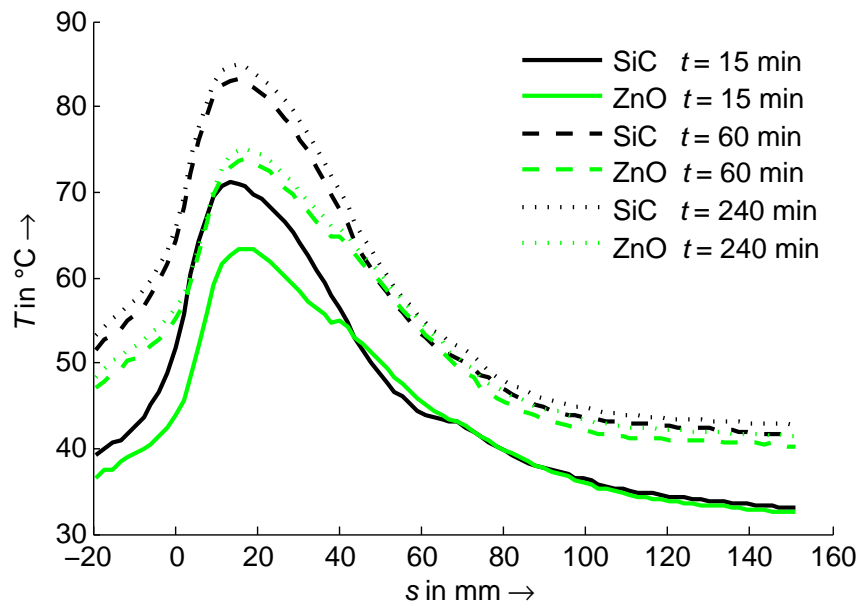


Abbildung 8.10.: Temperaturverteilung an 145-mVar und 145-mSiC bei  $U = 40 \text{ kV}$  und  $T = 30 \text{ °C}$ . Die Stäbe sind übereinander angebracht. Die Aufnahmen erfolgten mit der Kamera der Marke Infratec.

sondern die Verluste führen auch zu einer Erwärmung des Endenglimmschutzes. Gleichzeitig ist der wirksame Bereich des mikrovaristorgefüllten Systems wieder etwas größer.

Um die Grenzen der Endenglimmschutzsysteme sowie deren thermische Stabilität untersuchen zu können, werden sehr kurze Anstriche  $l_{\text{EGS}} = 80 \text{ mm}$  auf die Stäbe 80-mVar und 80-SiC appliziert. Die Prüfung wird bei  $U_p = 40 \text{ kV}$  und kontrollierter Umgebungstemperatur  $T = 30 \text{ °C}$  und  $T = 40 \text{ °C}$  jeweils für mindestens  $t = 180 \text{ min}$  durchgeführt. Mit einer höheren Spannung kann aufgrund einsetzender Teilentladungen (siehe Abschnitt 8.4) nicht geprüft werden. Die Ergebnisse sind in **Abbildung 8.11** und **Abbildung 8.12** dargestellt. Ein Einfluss der Anordnung der Prüflinge zueinander kann ausgeschlossen werden, da in einer Gegenmessung die Position vertauscht wurde (siehe **Abbildung C.15**). In beiden Fällen zeigt sich ein ähnliches Verhalten. So werden am mikrovaristorgefüllten Stab 80-mVar deutlich geringere absolute Temperaturen gemessen. Die Bereiche der Maxima sind aber nahezu identisch. Außerdem ist der Bereich, der sich erwärmt, bei beiden Materialien ähnlich, was keinen Widerspruch zu den unterschiedlich hohen Maximaltemperaturen darstellt, sondern dafür spricht, dass beim Stab 80-mVar ein größerer Bereich leitend wird. Dieses Ergebnis bestätigt die Ergebnisse bei den Aufnahmen der Potentialverläufe. Zudem können beide Lacke unter den angewendeten Versuchsbedingungen als stabil angesehen werden.

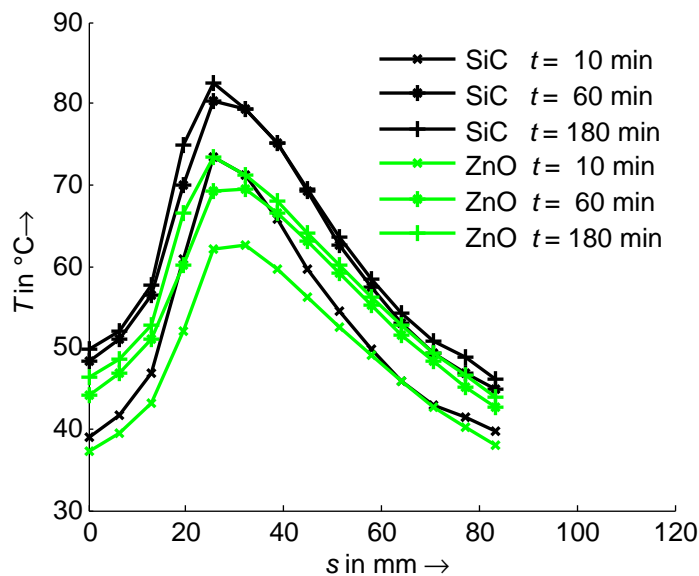


Abbildung 8.11.: Temperaturverteilung an 80-mVar und 80-SiC bei  $U = 40 \text{ kV}$  und  $T = 30 \text{ °C}$ . Die Stäbe sind übereinander angebracht. Die Aufnahmen erfolgten mit der Kamera der Marke Flir.

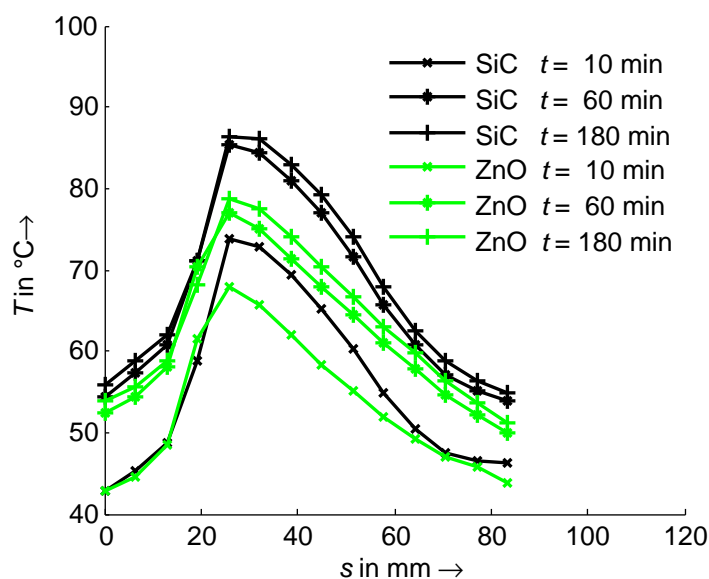


Abbildung 8.12.: Temperaturverteilung an 80-mVar und 80-SiC bei  $U = 40 \text{ kV}$  und  $T = 40 \text{ °C}$ . Die Stäbe sind übereinander angebracht. Die Aufnahmen erfolgten mit der Kamera der Marke Flir.

Tabelle 8.4.: Zusammenstellung der Teilentladungseinsatz-Einsatzspannungen an Wicklungsstabmodellen mit unterschiedlichen Endenglimmschutzsystemen

Stabmodell	$U_e$ in kV
80-mVar	27,5
80-SiC	20
145-mVar	> 40
145-SiC	> 40

## 8.4. Teilentladungsmessungen an Wicklungsstabmodellen

Der Einsatz von Glimmentladungen an der Oberfläche einer Gleitanordnung ist als kritisch anzusehen, da aufgrund der starken kapazitiven Verkopplung nach einer kleinen Spannungsänderung ein Leader an der Oberfläche entstehen kann. Dementsprechend müssen die Endenglimmschutzsysteme auch bei Betriebsspannung den Teilentladungseinsatz unterdrücken. Die Untersuchungen werden an jeweils zwei Varianten der Stabmodelle 80-mVar, 80-SiC, 145-mVar und 145-SiC mit der schon beschriebenen UV Kamera (siehe Tabelle B.3) durchgeführt. An einem Stab ohne einen EGS-Anstrich wird die Einsatzspannung zu  $U_e \approx 21$  kV gemessen. Das Ergebnis ist in **Tabelle 8.4** zusammengefasst. Es ist zu erkennen, dass die längeren Anstriche ( $l = 145$  mm) auf den Stäben 145-mVar und 145-SiC offenkundig ausreichen, um bei den notwendigen Prüfspannungen ( $U < 40$  kV) Entladungen an der Oberfläche zu unterdrücken. Unterschiede zwischen den beiden Endenglimmschutzsystemen treten bei den kurzen,  $l = 80$  mm langen Anstrichen auf. Das SiC-gefüllte System ist nicht mehr in der Lage, die einsetzenden Glimmentladungen zu unterdrücken, da die Einsatzspannung derjenigen ohne ein EGS-System entspricht. Im besonderen wirkt sich der höhere Nichtlinearitätskoeffizient des mikrovaristorgefüllten Endenglimmschutzlackes verbunden mit dem scharfen Kennlinienknick positiv auf die Einsatzspannung der Glimmentladungen aus. Vielmehr gewährleistet er auch bei Betriebsspannungen eine ausreichende Steuerung, die sich in der Unterdrückung des Teilentladungen zeigt.

## 8.5. Fazit der Anwendungsmöglichkeiten mikrovaristorgefüllter Endenglimmschutzsysteme

Der Vergleich der beiden Endenglimmschutzlacke ist in **Tabelle 8.5** zusammengefasst. Auch wenn sich die Einbindung in den Phenolharzlack aufgrund der Dichte

Tabelle 8.5.: Vergleich von mikrovaristorgefülltem und SiC-gefüllten EGS

	ZnO	SiC
Feldsteuerung bei $U_B$	+	+
Feldsteuerung bei $U_P$	++	-
Thermisches Verhalten	+	+
Verfügbarkeit	+	-
TE-Einsatz	+	-

des Mikrovaristorpulvers schwieriger gestaltet als beim konventionellen SiC, zeigt sich die prinzipiell bessere Eignung der Mikrovaristoren für den Endenglimmschutz in elektrischen Maschinen. Die Kennlinie eines Lackes mit einem  $E_b = 500 \text{ V/mm}$  genügt den Anforderungen an eine elektrische Potentialsteuerung. Eine Variation war daher nicht notwendig. In Abschnitt 2.2.3.3 wird beschrieben, dass mit einem niedrigeren Schaltpunkt die notwendige Länge des Lackes größer wird. Dies spielt aber aufgrund der Dimensionen einer elektrischen Maschine sowohl ökonomisch als auch technisch nur eine untergeordnete Rolle. Es konnte zunächst eine Linearisierung der elektrischen Potentialverteilung bei anliegenden Prüfspannungen gezeigt werden. Die Resultate können zusätzlich durch thermografische Aufnahmen bestätigt werden. Bei der Untersuchung unterschiedlicher Systeme haben IR-Kamerasysteme den Vorteil, dass mit ihnen die Prüflinge rückwirkungsfrei und im direkten Vergleich untersucht werden können. Zusätzlich zeigen die Ergebnisse der Teilentladungsmessung die Steuerfähigkeit des mikrovaristorgefüllten Endenglimmschutzsystems während des Betriebs. Es muss zudem berücksichtigt werden, dass das Lacksystem sich zwar bewährt hat, aber selbst nicht auf Mikrovaristoren abgestimmt ist. Eine Optimierung der Matrix ist daher notwendig. Es kann sowohl der Phenolharzlack angepasst als auch ein Epoxidharzsystem verwendet werden. Die Lacke müssen nun noch bei erhöhten Temperaturen, wie sie z.B. bei Lastwechselversuchen auftreten, geprüft werden. Offen ist zudem noch, ob sich die durchgeführten thermografischen Untersuchungen mit elektrothermischen Versuchen vergleichen lassen.

## 9. Mittelspannungskabelgarnituren

### 9.1. Beschreibung der untersuchten Modelle

Moderne Mittelspannungsendverschlüsse, die nur auf ein präpariertes Kabelende aufgeschoben werden müssen, stellen einfache und effiziente Produkte dar. Die wesentlichen Elemente sind neben einem Feldsteuerelement FSE, das sowohl geometrisch, refraktiv oder resistiv steuernd ausgeführt sein kann, der äußere Isolierkörper, der z.B. aus Silikon, EPDM, PE usw. bestehen kann. Unterschieden wird der Isolierkörper nach Freiluft- oder Innenraumanwendungen. Die in der vorliegenden Arbeit ausschließlich untersuchten Aufschiebeendverschlüsse mit einer Silikonhülle stellen eine Alternative zu Garnituren mit Warmschrumpfelementen dar. Nach VDE-0276-620 wird die verwendete Kabelgarnitur mit den folgenden Spannungen  $U_0/U(U_m)$  charakterisiert.

- $U_0 = 12 \text{ kV}$ : Effektivwert zwischen einem isolierten Leiter und Erde
- $U = 20 \text{ kV}$ : Effektivwert zwischen zwei Außenleitern eines Kabelsystems
- $U_m = 24 \text{ kV}$ : Höchste Spannung für ein Betriebsmittel

Ein Beispiel des untersuchten Endverschlusses für Innenraumanwendung mit  $U_m = 24 \text{ kV}$  sowie ein Schnitt durch die Garnitur, der das mikrovaristorgefüllte Feldsteuerelement zeigt, sind in **Abbildung 9.1** zu sehen. Die Endverschlüsse wurden durch die Behr Bircher Cellpack BBC Radeberg GmbH<sup>23</sup> freundlicherweise gefertigt und zur Verfügung gestellt. Der Schirm der Garnitur ist teilweise für die Untersuchungen entfernt worden. Das Feldsteuerelement hat eine Länge von  $l = 80 \text{ mm}$ . Aus der Literatur sind nach aktuellem Stand nur mikrovaristorgefüllte Mittelspannungsgarnituren mit dem Schaltpunkt  $E_b = 1000\text{--}1200 \text{ V/mm}$  bekannt (u.a. [Str00], [Gra03c]). Eine Variation des Schaltpunktes wird dagegen nicht beschrieben. In der vorliegenden Arbeit soll neben dem Anwendungsprinzip *Silikon-Aufschiebeendverschluss* auch die Verwendung niedrigerer Schaltpunkte geprüft werden. Aus diesem Grund werden neben den Versuchen mit einem Schaltpunkt von  $E_b = 1200 \text{ V/mm}$  Simulationen mit geringerem Schaltpunkt ( $E_b = 500 \text{ V/mm}$ )

---

<sup>23</sup>Besonderer Dank gilt Hrn. Gerald Jacob und Hrn. Stephan Arndt



Abbildung 9.1.: Schnitt durch eine  $U_n = 20$  kV-Mittelspannungskabelgarnitur für eine Innenraumanwendung mit einem mikrovaristorgefüllten Feldsteuerelement.

durchgeführt. Ein geringerer Schaltpunkt reduziert zwar die auftretenden Feldstärken, führt aber zu keinem kompakteren Design, wie mit Hilfe von Gleichung 2.18 deutlich wird. Die Betrachtung kann jeweils für die Nenn-Steh-Blitzstoßspannung oder die Prüfwechselspannung erfolgen:

Anlehnung an Prüfwechselspannung,  $U_P = 54$  kV :

$$\delta = \frac{U_P}{E_b} = \frac{54 \text{ kV}}{1200 \text{ V/mm}} = 45 \text{ mm} \quad (9.1)$$

$$\delta = \frac{U_P}{E_b} = \frac{54 \text{ kV}}{500 \text{ V/mm}} = 102 \text{ mm} \quad (9.2)$$

Anlehnung an Nenn-Steh-Blitzstoßspannung,  $\hat{u}_P = 125$  kV :

$$\delta = \frac{\hat{u}}{E_b} = \frac{125 \text{ kV}}{1200 \text{ V/mm}} = 104,2 \text{ mm} \quad (9.3)$$

$$\delta = \frac{\hat{u}}{E_b} = \frac{125 \text{ kV}}{500 \text{ V/mm}} = 250 \text{ mm} \quad (9.4)$$

Eine Halbierung des Schaltpunktes bedingt also eine Verdopplung der Länge des FSE. Die geometrischen Eigenschaften der untersuchten FSE entsprechen den in Abschnitt 6.3.1 verwendeten schlauchförmigen Prüflingen.

Die Untersuchungen zur Überslagspannung, zum Teilentladungseinsatz, sowie zum thermischen Verhalten der unterschiedlichen Silikonelemente werden auf Kabelprüfstrecken <sup>24</sup> der Länge  $l = 1,2\text{--}1,5$  m durchgeführt. Exemplarisch dargestellt sind diese in Abbildung A.10. Während auf einer Seite die zu prüfenden FSE aufge-

---

<sup>24</sup>Typ: NA2X2Y 1x150 RM/25 12/20 kV



Abbildung 9.2.: Darstellung der Überlappung von FSE und halbleitender Schicht auf einer Kabelprüfstrecke sowie der Bemaßung mit dem Ursprung für die durchgeführten Untersuchungen

zogen werden können, ist die andere (Anschluss-)Seite mit einer Garnitur höherer Nennspannung  $U_n$  abgeschlossen (siehe Abbildung B.13). Der Durchmesser der Kabelisolierung beträgt mit halbleitender Schicht  $D_{HL} = 27 \text{ mm}$  und ohne halbleitende Schicht  $D_{Iso} = 25 \text{ mm}$ . Damit ergibt sich eine Dehnung  $\varepsilon_{\text{mech}}$  der Feldsteuerelemente zu  $\varepsilon_{\text{mech}}(D = 27 \text{ mm}) = 22,7 \%$  bzw.  $\varepsilon_{\text{mech}}(D = 25 \text{ mm}) = 13,6 \%$ :

$$\varepsilon_{\text{mech}} = \frac{D_{\text{Iso}} - D_i}{D_i} \cdot 100 \% \quad (9.5)$$

$$\varepsilon_{\text{mech}}(D = 27 \text{ mm}) = \frac{27 \text{ mm} - 22 \text{ mm}}{22 \text{ mm}} \cdot 100 \% = 22,7 \%$$

$$\varepsilon_{\text{mech}}(D = 25 \text{ mm}) = \frac{25 \text{ mm} - 22 \text{ mm}}{22 \text{ mm}} \cdot 100 \% = 13,6 \%$$

Diese Dehnungen sind notwendig, um einen ausreichenden Anpressdruck des FSE zur halbleitenden Schicht und zur Kabelisolierung zu gewährleisten. Der Einfluss der mechanischen Dehnung auf die nichtlineare Charakteristik der gefüllten Polymere wird in Abschnitt 6.3.1 gezeigt. Die Überlappung des FSE auf der äußeren halbleitenden Schicht des Kabels beträgt unabhängig vom verwendeten Silikon  $l_{\text{ü}} = 30 \text{ mm}$ . Sie ist exemplarisch in **Abbildung 9.2** erläutert. Zudem ist der Ursprung  $s = 0 \text{ mm}$  für die durchgeführten Untersuchungen eingetragen. Als Standard für die Prüfanforderungen für Mittelspannungsgarnituren ist die Norm DIN VDE 278-629-1 maßgeblich. Bei dieser Norm handelt es sich um das deutsche Äquivalent zu dem Standard HD 629.1, der strenger als die Norm IEC 61442 ist und dementsprechend angewendet wird. Für die Untersuchungen der Mittelspannungsgarnituren werden die Wechselspannungs-, die Teilentladungs- und die Stoßspannungsprüfung entlehnt und im folgenden Abschnitt beschrieben.

## 9.2. Untersuchung einer Mittelspannungsgarnitur mit mikrovaristorgefülltem Feldsteuerelement

Teilentladungen dürfen während des Betriebes einer Garnitur nicht auftreten, da sie zu einer Alterung der Isolation und somit zu einem frühzeitigen Ausfall der

Garnitur führen. Der Nachweis der inneren Teilentladungsfreiheit stellt damit ein wesentliches Mittel dar, um die Qualität der Mittelspannungsgarnituren zu gewährleisten, die sowohl das Material selbst als auch die Montage der Garnitur umfasst. Treten äußere Teilentladungen auf, spricht dies für eine unzureichende Steuerung durch das FSE. Dementsprechend müssen die mikrovaristorgefüllten Silikone auch bei diesen Betriebsbedingungen ausreichend steuern können. Sie sind dazu ganz besonders in der Lage, da sie refraktiv und resistiv steuernde Eigenschaften vereinen. Die Untersuchungen werden mit dem mikrovaristorgefüllten Silikon vom Typ A-1200 (siehe Tabelle 6.3) durchgeführt. Der Aufbau wird auf einer Prüfstrecke nach Abbildung B.13 durchgeführt, die in einer Höhe von  $h = 0,9$  m installiert ist. Bei den untersuchten Endverschlüssen mit  $U_m = 24$  kV muss der TE-Pegel bei der Prüfspannung  $U_P = 1,73 \cdot U_0 = 20,8$  kV  $Q_e < 10$  pC sein. Kombiniert werden die Prüfungen mit der Wechsellspannungsprüfung, bei der die Spannung  $U_P = 4,5 \cdot U_0 = 54$  kV für  $t = 5$  min gehalten werden muss. Folgendes Verfahren wird deshalb der Norm entlehnt:

- Bestimmung der Einsetzspannung  $U_e$  beim Steigern der Spannung
- Prüfung der Wechsellspannungsfestigkeit bei  $U_P = 4,5 \cdot U_0 = 54$  kV für  $t = 5$  min
- Belastung mit Stoßspannung: 10 Blitzstoßspannungen bei  $\hat{u}_{BIL} = 110$  kV
- Erneute Bestimmung von  $U_e$  beim Steigern der Spannung nach 16 Tagen spannungsloser Lagerung

Für die Versuche werden sechs Prüflinge verwendet. Die Messergebnisse sind um die atmosphärischen Einflüsse korrigiert. In der Versuchsreihe wird eine mittlere Einsetzspannung von  $U_e = 19,72$  kV ermittelt, die zu gering ist, um den Forderungen der Norm zu genügen. Es lässt sich allerdings nicht zuordnen, in welchem Bereich der Endverschlüsse die Teilentladungen jeweils auftreten. Während der Prüfung mit Wechsellspannung kam es allerdings zu keinem Ausfall der mikrovaristorgefüllten Feldsteuerelemente. Die Prüfung mit Blitzstoßspannung ist ein wichtiger Teil der Typenprüfung, da sie die Fähigkeit des FSE nachweist, bei hohen Spannungsbelastungen die Feldstärken ausreichend zu begrenzen. Nach VDE 278-1 müssen  $N = 10$  Stoßspannungen mit  $\hat{u}_P = 125$  kV jeder Polarität gehalten werden. Die Stoßspannungsprüfungen werden aber auf  $\hat{u}_P = 110$  kV bei ausschließlich positiver Polarität reduziert, da die Teilentladungseinsetzspannung erneut bestimmt werden soll. Bei keinem der sechs Prüflinge kam es zu einem Ausfall.

Die erneute Bestimmung der Teilentladungseinsetzspannung wird direkt sowie 3, 6, 9 und 16 Tage nach der Stoßspannungsprüfung wiederholt, um zu untersuchen, ob die beobachteten Effekte reversibel sind. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen



sind in **Tabelle 9.1** zusammengestellt. Die mögliche Ursache der generell niedrigen

Tabelle 9.1.: Einsetzspannung  $U_e$  der Teilentladungen von mikrovaristorgefüllten Silikonprüflingen des Typs A-1200 sowie der scheinbaren Ladung  $Q_e$  nach der Blitzstoßspannungsprüfung. Untersucht wird zu dem die Erholung der FSE nach einer spannungslosen Lagerung

	Eingang	1 Tag	3 Tage	6 Tage	9 Tage	16 Tage
$U_e$ in kV	19,72	12,66	12,95	13,04	13,46	14,12
$Q_e$ bei $U_P$ in pC	1,44	1,64	1,38	1,59	1,5	1,5

Teilentladungseinsetzspannung  $U_e$  kann in einer unzureichenden Kontaktierung der Schläuche und der äußeren halbleitenden Schicht des Kabels begründet sein. Allerdings ist eine genaue Lokalisierung der Entladungen nicht möglich gewesen. Eine Erholung der mikrovaristorgefüllten Schläuche ist auch nach 16 Tagen nicht zu erkennen. Es kann eine Beschädigung bzw. ein Effekt im Material angenommen werden. Im Vergleich dazu zeigt eine konventionelle Garnitur mit einem ausschließlich refraktiv steuernden Feldsteuerelement  $\epsilon_r = 15$  keine Reduzierung der Teilentladungseinsetzspannung.

### 9.3. Überschlagspannung mikrovaristorgefüllter Feldsteuerelemente

Die vorangegangenen Versuche haben gezeigt, dass die mikrovaristorgefüllten Silikone auch bei hohen Prüfblitzstoßspannungen ausreichend steuern können. Nach Durchführung der Prüfungen in Abschnitt 9.2 wird die mittlere Überschlagspannung durch das Steigerungsverfahren an den sechs Garnituren des vorangegangenen Versuchs bestimmt. Sie ergibt sich zu  $u_{d,50} = 160,2 \text{ kV}$  bei einer Standardabweichung  $\sigma = 6,3 \text{ kV}$ . Aus diesen Werten ergibt sich die Stehspannung  $\hat{u}_{d,0}$  zu:

$$\hat{u}_{d,0} = u_{d,50} - 3 \cdot \sigma = 160,2 \text{ kV} - 3 \cdot 6,3 \text{ kV} = 141,2 \text{ kV} \quad (9.6)$$

Die Prüfspannung  $\hat{u}_P = 125 \text{ kV}$  wird also nach wie vor gehalten, auch wenn die FSE nicht mehr die TE-Prüfung bestehen.

In einer weiteren Versuchsreihe soll der Einfluss der Länge  $l_{\text{FSE}} = 60\text{--}160 \text{ mm}$  der unterschiedlichen Feldsteuerelemente untersucht werden. Der Vergleich wird mit dem mikrovaristorgefüllten Silikonschlauch vom Typ A-1200 (siehe Tabelle 6.3 und Abbildung B.6) und einer konventionellen refraktiv steuernden Variante mit  $\epsilon_r = 15$  durchgeführt. Die Bestimmung der 50 %-Überschlagspannung  $\hat{u}_{d,50}$  wird wiederum mit dem Steigerungsverfahren durchgeführt. Der Aufbau ist in Abbildung

B.13 wiedergegeben. Die Feldsteuerschläuche sind wie die Garnituren mit einer Überlappung von  $l_{\text{ü}} = 30 \text{ mm}$  auf der halbleitenden Schicht des Kabels montiert, werden aber durch zusätzliche Silikonschläuche geschützt, um eine Beschädigung der Kabelprüfstrecken während der Versuche zu vermeiden. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind nach einer Korrektur der atmosphärischen Einflüsse in **Tabelle 9.2** zusammengefasst. Es zeigt sich, dass bei dem FSE aus einem rein refraktiv

Tabelle 9.2.: Vergleich der Überschlagspannung  $\hat{u}_{\text{d},50}$  bei Blitzstoß von refraktiv steuernden und mikrovaristorgefüllten Feldsteuerelementen

Länge Schlauch in mm	60	80	120	160
$\hat{u}_{\text{d},50,\text{mVar.}}$ in kV	129,5	163,1	194,7	207,6
$\hat{u}_{\text{d},50,\text{konv.}}$ in kV	111,7	111,3	113,9	115,2

steuernden Material keine Erhöhung der Überschlagspannung mit einem längeren Feldsteuerelement möglich ist. Dagegen erlauben längere mikrovaristorgefüllte Feldsteuerelemente eine erhebliche Steigerung der 50 %-Überschlagspannung, was ein Effekt der stark nichtlinearen Kennlinie ist. Dies ist ein genereller Hinweis darauf, dass die mikrovaristorgefüllten Feldsteuerelemente auch bei höheren Betriebsspannungen in der Lage sind, ausreichend zu steuern, indem sie verstärkt leitfähig werden. Allerdings konnten die Versuche nicht mit einem geringeren Schaltpunkt  $E_{\text{b}} = 500 \text{ V/mm}$  wiederholt werden. Im Weiteren konnte in keinem Fall ein Überschlag entlang der Grenzfläche FSE-VPE-Isolierung beobachtet werden. Daraus folgt, dass in diesem Bereich die Anpresskraft der mikrovaristorgefüllten Silikonschläuche ausreichend ist. Die thermischen Auswirkungen der zunehmenden Leitfähigkeit werden im folgenden Abschnitt untersucht.

## 9.4. Thermisches Verhalten mikrovaristorgefüllter Silikonelemente

Mit zunehmender Betriebsspannung können die konventionellen, refraktiv wirkenden Feldsteuerelemente nicht mehr eingesetzt werden, da die umgesetzten Verluste während des Betriebes zu hoch werden (siehe  $\tan\delta$  in Tabelle 2.1). Aus diesem Grund soll deren Erwärmung in Abhängigkeit der anliegenden Spannung mit der der mikrovaristorgefüllten Silikonschläuche vom Typ A-1200 verglichen werden. Zusätzlich wird die Länge der Prüflinge variiert. Vorgestellt werden im folgenden ausgewählte Beispiele, die das Verhalten der beiden Materialien exemplarisch zeigen und auf umfangreichen Versuchsreihen basieren (siehe [Kes13]). Die Untersuchungen der Feldsteuerschläuche werden einzeln in einem Labor mit geregelter

Umgebungstemperatur  $T_U = 30^\circ\text{C}$  auf Prüf Strecken durchgeführt. Die thermografische Untersuchung der Oberflächentemperatur auf den Feldsteuerelementen wird wie in Kapitel 8.3 mit einer Infrarot-Kamera (Flir Themorcam PM496, siehe Tabelle B.5) durchgeführt. Aus diesen Aufnahmen heraus werden zeitabhängig Temperaturverläufe erstellt. Der Ursprung der Messung der Temperaturverläufe liegt dabei jeweils am Beginn der Silikonschläuche, wie er in Abbildung 9.2 eingetragen ist. Das Prinzip der Auswertung mit der interessanten Tripel-Zone ist in **Abbildung 9.3** wiedergegeben. Der Vergleich der beiden Materialien ist unter Berücksichtigung der

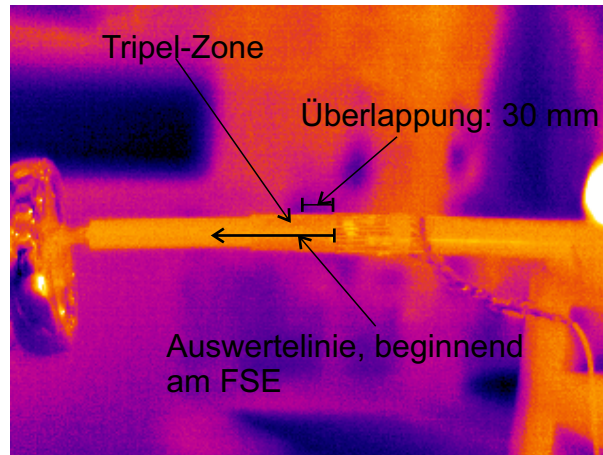


Abbildung 9.3.: Prinzip der Auswertung der thermografischen Aufnahmen der FSE unterschiedlichen Emissionskoeffizienten möglich, die in **Tabelle 9.3** zusammengefasst sind.

Tabelle 9.3.: Experimentell ermittelte Emissionskoeffizienten der untersuchten FSE

Silikon-Typ	$\varepsilon$
Konv.	0,89
A-1200	0,97

In einer ersten Versuchsreihe werden  $l_{\text{FSE}} = 80\text{ mm}$  lange Feldsteuerelemente miteinander verglichen, die von der Länge her den in der Garnitur eingesetzten entsprechen. Es wird eine Prüfspannung  $U_P = 2 \cdot U_0 = 40\text{ kV}$  für  $t = 240\text{ min}$  angelegt. Die Ergebnisse für den refraktiv steuernden Schlauch sind in **Abbildung 9.4** dargestellt. Der Schlauch hat nach  $t = 240\text{ min}$  eine Temperatur von  $T_{\text{max}} = 39^\circ\text{C}$  erreicht. Diese maximale Temperatur tritt bei  $s \approx 40\text{ mm}$  auf. Im Vergleich dazu ist in **Abbildung 9.5** die Temperaturentwicklung an einem mikrovaristorgefüllten Silikonschlauch dargestellt. Die maximale Temperatur beträgt bei diesem Prüfling  $T_{\text{max}} = 36^\circ\text{C}$  und wird bei  $s \approx 40\text{ mm}$  gemessen. Die Temperaturdifferenz von  $\Delta T \approx 3^\circ\text{C}$  zwischen den beiden FSE kann allerdings nicht als ein unterschiedli-

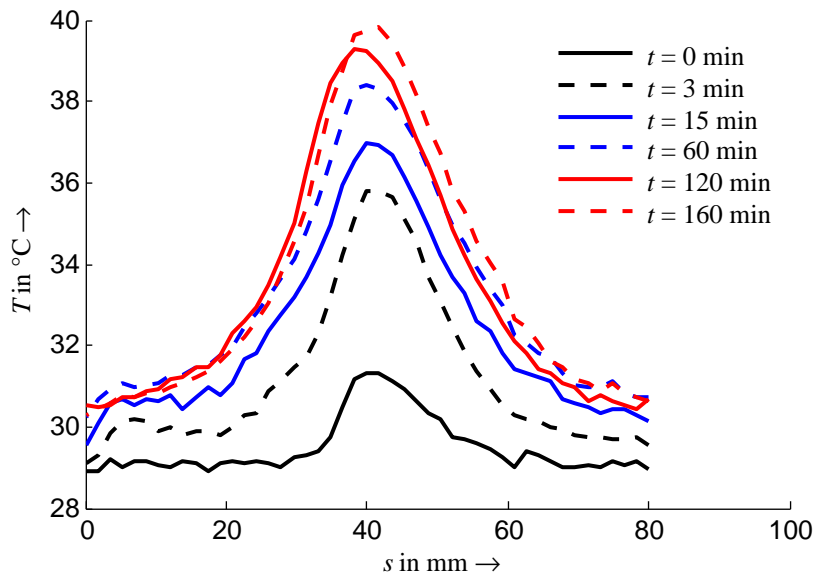


Abbildung 9.4.: Zeitabhängige Temperaturverläufe an einem konventionellen Feldsteuerschlauch der Länge  $l = 80$  mm bei  $U_P = 40$  kV

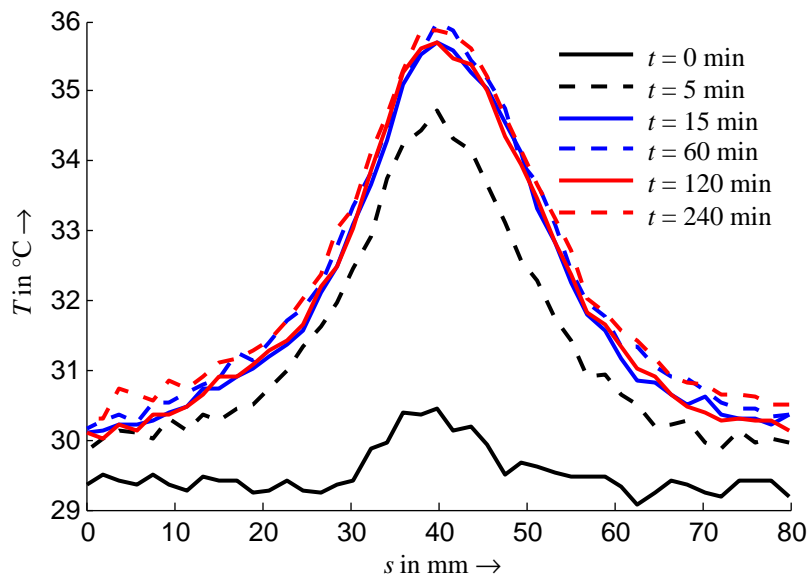


Abbildung 9.5.: Zeitabhängige Temperaturverläufe an einem mikrovaristorgefüllten Feldsteuerschlauch ( $E_b = 1200$  V/mm) der Länge  $l = 80$  mm bei  $U_P = 40$  kV

ches Verhalten der beiden Materialien gedeutet werden. Es ist erkennbar, dass die Erwärmung im Bereich des Kontaktbereichs zur halbleitenden Schicht bei beiden FSE nicht signifikant angestiegen ist. Damit ist in diesem Bereich kein Unterschied zwischen den beiden Materialien zu erkennen. Der eigentliche Temperaturanstieg beginnt erst im Bereich der Tripel-Zone bei  $s = 30$  mm. Generell erwärmen sich

beide Schläuche lokal in einem ähnlichen Bereich und erreichen bei  $s \approx 40$  mm die maximale Temperatur.

Eine weitere Versuchsreihe mit  $l_{\text{FSE}} = 120$  mm langen Feldsteuerschläuchen ist in den Abbildungen C.17 und C.18 im Anhang wiedergegeben. Prüfspannung und -dauer sind mit  $U_P = 40$  kV und  $t = 240$  min nicht geändert worden. Die maximale Temperatur beträgt am refraktiven Schlauch nach  $t = 240$  min  $T_{\text{max}} = 39$  °C und am mikrovaristorgefüllten  $T_{\text{max}} = 34,5$  °C. Der Temperaturunterschied beträgt somit  $\Delta T \approx 4,5$  °C und bestätigt die vorangegangenen Ergebnisse. Auch die maximale Temperatur wird wiederum bei  $s \approx 40$  mm erreicht.

Im Vergleich der in den Abbildungen 9.4 und 9.5 dargestellten Ergebnissen zeigt sich, dass die mikrovaristorgefüllten Feldsteuerelemente jeweils schneller einen stabilen Zustand erreichen. Eine mögliche Ursache ist die Temperaturabhängigkeit der Kennlinie. Da der nichtlineare Widerstand mit zunehmender Temperatur steigt (siehe Abbildung 6.11), ermöglicht dies einen stabilen Arbeitspunkt der Kennlinie. Im Weiteren zeigt der Vergleich, dass die Länge der Schläuche bei  $U_P = 40$  kV keinen Einfluss auf die umgesetzten Verluste hat. Dies ist im Falle einer refraktiven Steuerung prinzipbedingt, deutet aber bei dem mikrovaristorgefüllten Silikon ebenfalls an, dass es unter diesen Belastungen noch nicht angesteuert wird.

Zum Abschluss wird deshalb die Belastung auf  $U_P = 3 \cdot U_0 = 60$  kV gesteigert und  $l = 120$  mm lange Schläuche verwendet. Die Umgebungstemperatur wird nicht geändert. In **Abbildung 9.6** ist das Ergebnis des konventionellen Schlauches gezeigt. Der refraktive Schlauch erreicht am Ende des Versuchs eine maximale

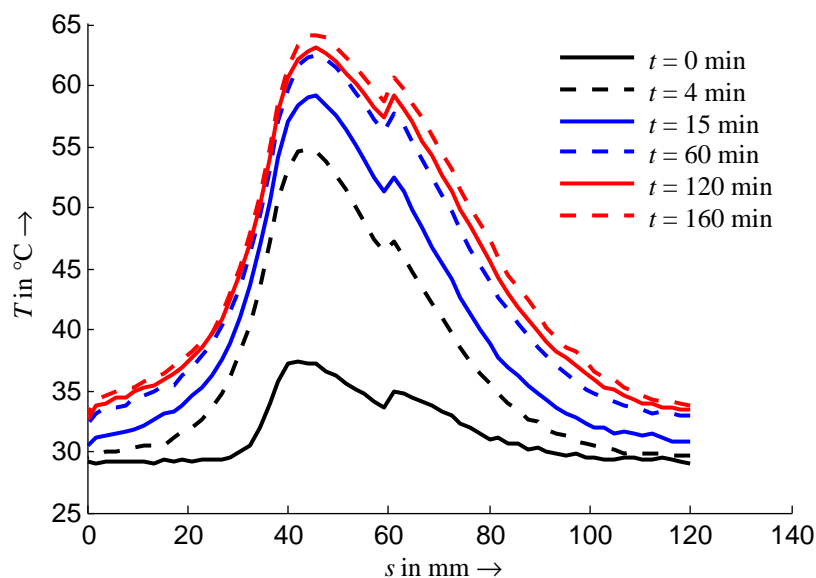


Abbildung 9.6.: Zeitabhängige Temperaturverläufe an einem konventionellen Feldsteuerschlauch der Länge  $l = 120$  mm bei  $U_P = 60$  kV

Temperatur von  $T_{\max} = 64^\circ\text{C}$ . Im Vergleich dazu ist die Erwärmung der mikrovaristorgefüllten Variante in **Abbildung 9.7** wiedergegeben. Aus dem Diagramm

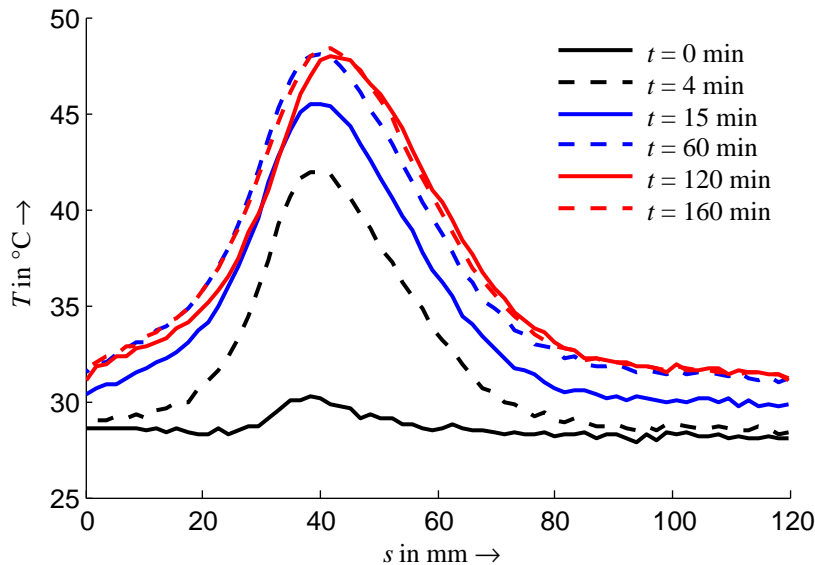


Abbildung 9.7.: Zeitabhängige Temperaturverläufe an einem mikrovaristorgefüllten Feldsteuerschlauch ( $E_b = 1200 \text{ V/mm}$ ) der Länge  $l = 120 \text{ mm}$  bei  $U_P = 60 \text{ kV}$

kann eine maximale Temperatur von  $T_{\max} = 47^\circ\text{C}$  an der Oberfläche gemessen werden. Der Unterschied zwischen den beiden Materialien fällt mit  $\Delta T \approx 17^\circ\text{C}$  bei  $U_P = 60 \text{ kV}$  wesentlich höher aus. Dies ist aufgrund der stark nichtlinearen  $U$ - $I$ -Kennlinie des mikrovaristorgefüllten Silikons umso bemerkenswerter. Auffällig ist bei allen vorgestellten Versuchsreihen, dass die Schlauchbereiche, die sich erwärmen, bei beiden Materialien jeweils ähnlich breit sind. Dies deutet darauf hin, dass auch bei den hohen Aussteuerungen die relative Permittivität des mikrovaristorgefüllten Silikons einen Einfluss auf die Steuerwirkung des FSE hat. Die Verluste sind daher nicht nur resistiv, sondern auch dielektrisch. Dies ist auch darin begründet, dass nur eine innere Schicht des FSE leitfähig angesteuert wird (siehe Abschnitt 6.3.1). Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sich die mikrovaristorgefüllten Silikone stabiler verhalten als die refraktiven Vergleichsobjekte. Generell konnte bei diesen Versuchen kein Ausfall der mikrovaristorgefüllten Feldsteuerelemente beobachtet werden. Das bedeutet, dass sich die nichtlineare Kennlinie in diesem Bereich nicht negativ auf die umgesetzten Verluste auswirkt. Als Ursache wird die Temperaturabhängigkeit der Kennlinie angenommen, da die Leitfähigkeit mit zunehmender Temperatur abnimmt, was ein stabiles Verhalten der mikrovaristorgefüllten Schläuche ermöglicht. Gegen einen Einsatz bei einer höheren Betriebsspannung sprechen die Ergebnisse daher nicht. Die Versuche mit gefüllten Silikonen mit einem Schalt-

punkt  $E_b = 500 \text{ V/mm}$  konnten noch nicht durchgeführt werden. Aufgrund der in Abbildung 6.8 gezeigten Kennlinie ist zu erwarten, dass die Erwärmung höher ausfallen wird, da der Leckstrom bei diesen Schläuchen um eine Größenordnung höher ist.

## 9.5. Simulation mikrovaristorgefüllter Kabelgarnituren

Die beschriebenen Untersuchungen der mikrovaristorgefüllten Kabelgarnituren werden durch Simulationsrechnungen<sup>25</sup> abgeschlossen, da sie den Vorteil bieten, zusätzliche Variationen der FSE zu betrachten. Im Besonderen erlauben sie eine einfache Änderung des Schaltpunktes und der damit verbundenen nichtlinearen Kennlinie. Um zur Literatur vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, erfolgen die Simulationen auf Basis der in [Wei11b] dargestellten und in Abbildung A.11 wiedergegebenen Modellanordnung der Mittelspannungsgarnitur, die auch in Abschnitt 9.2 untersucht worden ist.

Die Simulationsrechnungen werden für eine Wechselspannung von  $U_P = 2 \cdot U = 40 \text{ kV}$  durchgeführt. Zunächst wird der Einfluss der Länge  $l_e$ <sup>26</sup> des Feldsteuerelementes eines Materials mit  $\epsilon_r = 15$  auf die auftretende tangentielle elektrische Feldstärke  $E_t$  untersucht, wie es zur refraktiven Steuerung eingesetzt wird (siehe 2.1 Abschnitt 2.2.3.1). Das Ergebnis ist in **Abbildung 9.8** zusammengefasst. Es zeigt sich, dass

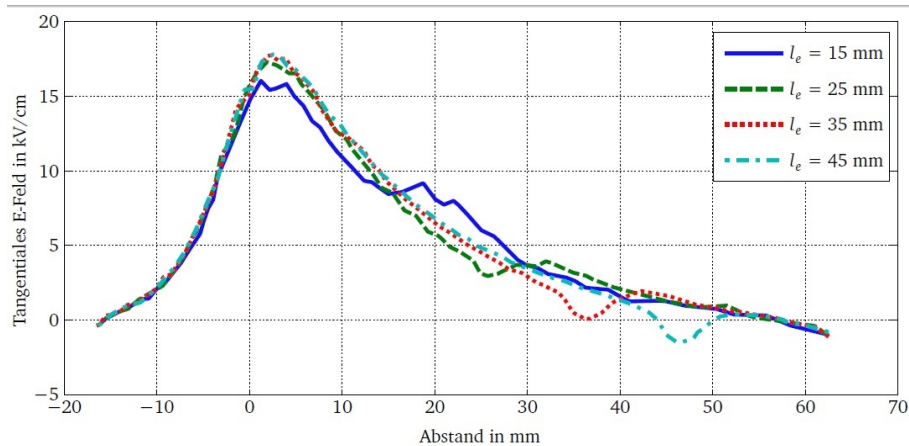


Abbildung 9.8.: Einfluss der Länge  $l_e$  eines refraktiv steuernden Feldsteuerelementes mit  $\epsilon_r = 15$  bei einer Spannung  $U_P = 40 \text{ kV}$

eine Verlängerung des refraktiven Feldsteuerelementes mit einem reinen linearen  $\epsilon_r$  keine Reduzierung der elektrischen Feldstärke und damit eine verbesserte Feldsteuerung bewirken kann. Das Ergebnis bestätigt die experimentellen Untersuchungen

<sup>25</sup>Die vollständigen Untersuchungen sind in [Dra12] dargestellt und wurden gemeinsam mit dem Institut TEMF der TU Darmstadt durchgeführt.

<sup>26</sup>Die Länge  $l_e$  ist als die Länge des Teils des FSE definiert, der über der Isolation liegt.

zur Bestimmung der Überschlagnspannung in Abschnitt 9.3. Der maximale Wert  $E_{t,max} \approx 17 \text{ kV/cm}$  kann als unkritisch betrachtet werden, da bei dieser Belastung noch keine Teilentladungen beobachtet werden konnten (siehe Abschnitt 9.2). Im Vergleich dazu werden mikrovaristorgefüllte Feldsteuerelemente unterschiedlicher Schaltpunkte  $E_b$  simuliert. Zunächst wird ein mikrovaristorgefülltes Silikon mit  $E_b = 1200 \text{ kV/cm}$  nachgebildet, wie es auch in den vorherigen Abschnitten und in den in Kapitel 6 vorgestellten Charakterisierungen untersucht wird. Die verwendete Kennlinie ist bei Wechselspannung an einem mikrovaristorgefüllten Silikon des Typs A-1200 aufgenommen worden. Variiert wird wiederum die Länge  $l_e$  des Feldsteuerelementes. Das Ergebnis ist in **Abbildung 9.9** zu sehen. Die unterschied-

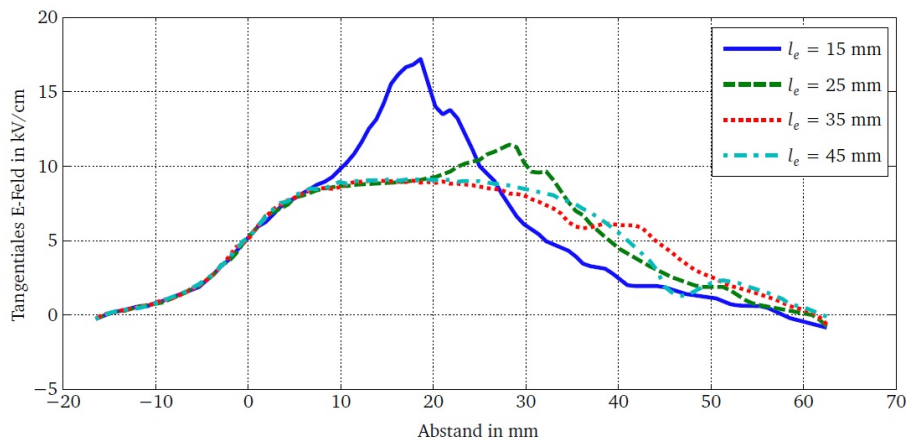


Abbildung 9.9.: Simulation bei  $U_p = 40 \text{ kV}$  eines mikrovaristorgefüllten Feldsteuerelementes mit dem Schaltpunkt  $E_b = 1200 \text{ V/mm}$  und Auswertung in Abhängigkeit der Länge  $l_e$  des FSE

lichen Verläufe der tangentialen elektrischen Feldstärke  $E_t$  in Abhängigkeit der Länge zeigen sich deutlich. Mit  $l_e = 15 \text{ mm}$  ist das FSE offenkundig zu kurz, da die Feldstärke mit  $E_{t,max} = 17 \text{ kV/cm}$  von gleicher Größe wie zuvor beim refraktiven FSE ist. Eine Reduktion der maximalen elektrischen Feldstärke auf den Schaltpunkt  $E_{t,max} = 9 \text{ kV/cm} \approx E_b$  kann erst bei einer Länge  $l_e = 35 \text{ mm}$  erreicht werden. Im Vergleich zum refraktiven FSE kann bei dieser Belastung aber nicht gesagt werden, mit welchem der beiden Materialien ein kürzeres Feldsteuerelement möglich ist. Auf der Basis der Messdaten, die bei einem mikrovaristorgefüllten Silikon mit dem Schaltpunkt  $E_b = 500 \text{ V/mm}$  aufgenommen worden sind, werden die Simulationsrechnungen erneut durchgeführt. Eine derartige Variation des Schaltpunktes eines mikrovaristorgefüllten Feldsteuerelementes ist in der Literatur noch nicht verfügbar und kann aber eine optimale Anpassung an die Anwendung ermöglichen. Es wird wiederum die Variation der Länge des Feldsteuerelementes untersucht. Die berechnete tangential elektrische Feldstärke ist in **Abbildung 9.10** dargestellt. Es zeigt sich wiederum die deutliche Begrenzung der tangentialen elektrischen Feldstärke



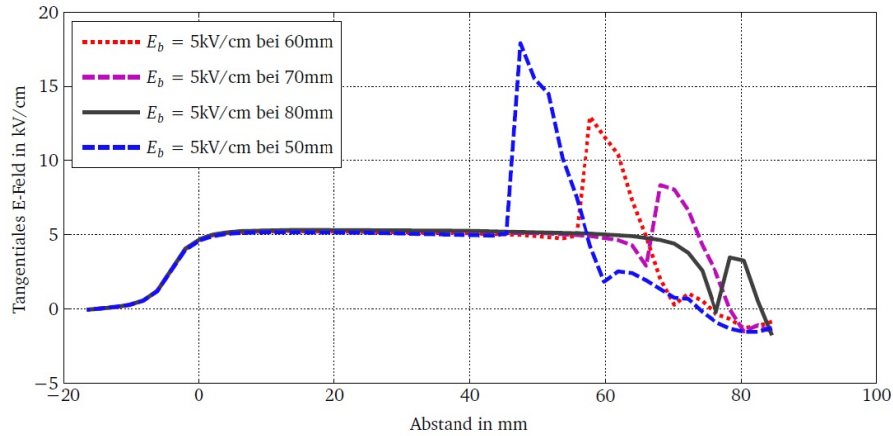


Abbildung 9.10.: Simulation eines mikrovaristorgefüllten Feldsteuerelementes mit  $E_b = 500 \text{ V/mm}$ , dessen Länge variiert wird

auf den Wert des Schaltpunktes  $E_b$  im Bereich des mikrovaristorgefüllten Feldsteuerelementes. Allerdings zeigt sich erst ab einer Länge von  $l_e = 80 \text{ mm}$  keine erhöhte Feldstärke am Übergang zur Kabelisolation. Für kürzere Längen ist der mikrovaristorgefüllte Feldsteuerschlauch zu leitfähig, so dass die Feldüberhöhungen an das Ende des Schlauches verlagert werden. Die Ergebnisse haben eine wichtige Konsequenz für das Design eines Feldsteuerelementes. Eine Reduzierung der maximalen tangentialen Feldstärke  $E_t$  ist entsprechend des geringeren Schaltpunktes möglich, allerdings ist damit eine Verlängerung des Feldsteuerelementes verbunden, wie sie aus Gleichung 9.4 folgt. Ein zusätzlicher Einfluss der höheren relativen Permittivität  $\epsilon_r = 15 - 20$  ist dabei nicht zu beobachten. Das Verhalten des FSE wird also im Wesentlichen durch die nichtlineare  $U$ - $I$ -Kennlinie des Materials bestimmt. Für den niedrigen Schaltpunkt ergibt sich aus der Simulation eine notwendige Länge von  $l_e = 80 \text{ mm}$  für das FSE. Im Vergleich zu Abbildung 9.8 zeigt sich, dass mit diesem Schaltpunkt keine Verbesserung der Abmessungen des bestehenden refraktiven Feldsteuerelementes möglich ist. Dies bedeutet, dass für das vorliegende Design der Mittelspannungsgarnituren keine geringeren Schaltpunkte von Interesse sind. Generell sind aber Konstruktionen denkbar, die ein längeres Element verwenden. Nachteilig ist noch, dass die entstehenden thermischen Verluste in den verwendeten Simulationsmodellen nicht berücksichtigt werden. Diese werden beim Material mit  $E_b = 500 \text{ V/mm}$  höher sein, da der Leckstrom deutlich höher ist (siehe Abbildung 6.8). Diese Betrachtungen müssen entsprechend in weitergehenden Untersuchungen berücksichtigt werden.

## 9.6. Fazit der Anwendungsmöglichkeiten mikrovaristorgefüllter Feldsteuerelemente

Abschließend sollen die Ergebnisse der untersuchten Feldsteuerelemente zusammengefasst und bewertet werden. Eine Übersicht ist in **Tabelle 9.4** gegeben.

Tabelle 9.4.: Zusammenfassung und Vergleich von mikrovaristorgefülltem und rußgefüllten FSE

Eigenschaft	ZnO	konv.
Feldsteuerung bei $U_B$	+	+
Feldsteuerung bei $U_P$	++	+-
Thermisches Verhalten	+	+
Verfügbarkeit	+	+
Längenabhängigkeit $E_{t,max}$	hoch	gering
Dickenabhängigkeit $E_{t,max}$	gering	hoch
Teilentladungseinsatz	nicht gelöst	+

Die mikrovaristorgefüllten Feldsteuerelemente haben ihr Potential zur Feldsteuerung in Kabelgarnituren bei den Prüfungen mit Blitzstoßspannungen gezeigt. Es konnte nachgewiesen werden, dass sie bei gleichen Abmessungen gegenüber einem konventionellen refraktiven Feldsteuerschlauch über eine wesentlich höhere mittlere Überschlagspannung verfügen. Diese lässt sich mit zunehmender Länge aufgrund der nichtlinearen Kennlinie steigern. Dies ist erwartungsgemäß bei refraktiv steuernden Systemen nicht möglich.

Auch konnte bei erhöhter Wechsellspannungsprüfung kein Ausfall der Endverschlüsse mit mikrovaristorgefüllten Feldsteuerschläuchen festgestellt werden. Dagegen konnte die Ursache der geringen Teilentladungseinsetzspannung nicht geklärt werden. Diese kann sowohl in Beschädigungen im Material als auch einer für das mikrovaristorgefüllte Silikon ungeeigneten Montage begründet sein. Die starke Reduktion der Einsetzspannung nach den Stoßspannungsbelastungen deutet allerdings auf eine mögliche Beschädigung der Silikonmatrix hin. Im Weiteren zeigen die Ergebnisse, dass gerade die Kabelgarnituren mit den auftretenden hohen elektrischen Feldstärken eine besondere Berücksichtigung der Verarbeitung des Materials erfordern. Diese konnte in der vorliegenden Arbeit nur bedingt durchgeführt werden. Eine Silanisierung des Pulvers bringt Vorteile durch stabilere elektrothermische Eigenschaften des gefüllten Silikons, konnte aber noch nicht in der tatsächlichen Anwendung einer Mittelspannungsgarnitur gezeigt werden. Bei der Installation von Garnituren mit mikrovaristorgefüllten Feldsteuerelementen muss nicht nur eine

ausreichende Anpresskraft zwischen der Garnitur und der Kabelisolation gewährleistet werden, sondern auch im Besonderen ein ausreichender Kontakt der Garnitur zur halbleitenden Schicht hergestellt werden. Diese Ergebnisse decken sich mit den charakterisierenden Untersuchungen in Kapitel 6.3.1.

Die Simulationsrechnungen bestätigen, dass die Dicke eines mikrovaristorgefüllten Feldsteuerelementes einen geringeren Einfluss als bei den konventionellen Systemen hat. Eine Aufnahme der Potentialverteilungen zur Validierung war aufgrund der Geometrie der Anordnung nicht möglich. Zudem kann nicht ausgeschlossen werden, dass sich die an plattenförmigen Prüflingen gemessenen  $\hat{u}$ - $\hat{i}$ -Kennlinie nicht auf die Anwendung bei Feldsteuerschläuchen übertragen lässt. Dieser Effekt konnte auch bei den Verbundisolatoren beobachtet werden. Feldsteuerelemente mit einem geringeren Schaltpunkt ermöglichen zwar eine deutlichere Reduktion der elektrischen Feldstärke, allerdings sind dafür längere Elemente notwendig. Für Aufschiebegarnituren kann dies eher ein Nachteil sein, da die Garnitur länger werden muss. Die Untersuchungen konnten zwar nicht abgeschlossen werden, aber sie zeigen eine Begrenzung des einsetzbaren Schaltpunktes nach unten, da Bereiche  $E_b = 500 \text{ V/mm}$  keine Vorteile zu bieten scheinen.

Die in den FSE umgesetzten Verluste wurden mit einer IR-Kamera untersucht. Bei erhöhten Prüftemperaturen zeigte sich, dass die Erwärmung der mikrovaristorgefüllten Silikone geringer war als die der vergleichbaren rußgefüllten Polymere. Gleichzeitig zeigten die mikrovaristorgefüllten FSE eine höhere Stabilität während dieser Versuche. Auch wenn diese Ergebnisse als positiv beurteilt werden können, lassen sich noch keine Aussagen darüber treffen, ob die mikrovaristorgefüllten Feldsteuerelemente bei Hochspannung  $U_m > 52 \text{ kV}$  eingesetzt werden können. Zusätzlich sind Lastwechselversuche notwendig, die das Betriebsverhalten der mikrovaristorgefüllten Silikone nachbilden. Es konnte gezeigt werden, dass mit mikrovaristorgefülltem Silikon unabhängig vom verwendeten Schaltpunkt eine Kombination von refraktiver und resistiver Feldsteuerung in einem Mittelspannungsendverschluss möglich ist. Hier zeigen sich klare Vorteile gegenüber den refraktiv wirkenden Feldsteuerelementen.



## 10. Anwendungsvergleich und Zusammenfassung

Abschließend werden die vorgestellten Ergebnisse der Anwendungsmöglichkeiten mikrovaristorgefüllter Polymere bewertet und in Abhängigkeit der einzelnen Betriebsmittel miteinander verglichen. Zusätzlich wird die Charakterisierung der eingesetzten Polymere - Silikone und Phenolharzlacke - zusammengefasst. Die Charakterisierung der mikrovaristorgefüllten Polymere hat gezeigt, dass die elektrischen Eigenschaften zwar im Wesentlichen durch den Schaltpunkt bestimmt werden, das mechanische und thermische Verhalten aber auch von den verwendeten Polymeren abhängt. Diese Zusammenhänge haben sich aber nicht zwangsläufig als Nachteile für die Anwendungen erwiesen.

Für die elektrische Charakterisierung von mikrovaristorgefüllten Polymeren können Methoden aus bestehenden Normen entlehnt werden, solange es möglich ist, die stark nichtlineare  $U$ - $I$ -Kennlinie zu berücksichtigen. Dies zeigt sich sowohl bei der Verwendung von Schutzringanordnungen als auch der Auswertung von Wechsel- und Gleichspannungskennlinien. Zusätzlich ist bei Wechselspannung eine phasenaufgelöste Bestimmung von resistivem und kapazitivem Stromanteil notwendig. Dagegen hat sich bei der Gleichspannungscharakteristik die Messzeit als bestimmender Parameter gezeigt. Es wird empfohlen, beide Aspekte in der Normung zu berücksichtigen, um nichtlineare Materialien adäquat charakterisieren zu können. Sowohl die Wechsel- als auch die Gleichspannungskennlinie sind aber stark temperaturabhängig, was eine genaue Einhaltung der Messtemperatur erfordert. In Bezug auf die Durchschlagfestigkeit und die Temperaturstabilität haben sich Vorteile von silanisierten Mikrovaristoren im Silikon gezeigt. Generell muss daher der Fokus bei der Materialentwicklung auf die Einbettung der Mikrovaristoren in die Silikonmatrix gelegt werden. Zusätzlich sind qualitative Unterschiede der temperaturabhängigen Kennlinie von Silikonen und Phenolharzlacken aufgetreten, die teilweise gegenläufig sind.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass mikrovaristorgefüllte Silikone sowohl in Verbundlangstabisolatoren als auch in den Feldsteuerelementen von Mittelspannungskabelgarnituren eingesetzt werden können. Variiert wurde in beiden Fällen der Schaltpunkt der eingesetzten Mikrovaristoren. Bei letzteren haben sie ihr Poten-

tial gezeigt, elektrische Felder wirkungsvoller als konventionelle refraktive Systeme zu unterdrücken. Im Weiteren haben sie nicht nur ihre Wechselspannungsfestigkeit bewiesen, sondern auch eine höhere mittlere Überschlagspannung als die refraktiv wirkenden Feldsteuerelemente gezeigt.

Bei den Verbundisolatoren müssen die Strünke galvanisch an die Armaturen angeschlossen werden, auch wenn die Mikrovaristoren nur lokal angesteuert werden. Es hat sich gezeigt, dass Isolatoren, die Komponenten aus mikrovaristorgefülltem Silikon enthalten, weniger anfällig gegenüber Wassertropfenkorona sind. So konnte der Einsatz von Teilentladungen während Wechselspannungsversuchen unter Regen reduziert werden. Hier haben sich neue Einsatzmöglichkeiten gezeigt, die aufgrund der stark nichtlinearen Kennlinie und den damit verbundenen Effekten möglich werden. Globale Steuerungen der Potentialverteilung längs des Isolatorstrunks sind mit den untersuchten mikrovaristorgefüllten Silikon nicht beobachtet worden. Zusätzlich hat sich dabei ein Effekt der Länge des Stabes auf dessen resultierende Kennlinie gezeigt. So kann die Potentialverteilung nicht beeinflusst werden. Ein wirklicher negativer Einfluss der nichtlinearen Kennlinie auf die Überschlagspannung hat sich aber nur bei denjenigen Isolatoren gezeigt, die ohne Schirmringe bei Blitzstoßspannung geprüft wurden. Weiterhin zeigte sich, dass die Mikrovaristoren keine messbare Erwärmung während des Betriebs zur Folge haben. Wenn auch einige Varianten mikrovaristorgefüllten Isolatoren Prüfungen in einer Salznebelkammer bestanden haben, stehen noch Versuche aus, die ein verbessertes Fremdschichtverhalten bei starken Verschmutzungen zeigen und somit evtl. Trockenzoneüberschläge vermeiden können. Für einen direkten Freilufteinsatz ist das mikrovaristorgefüllte Silikon aufgrund seines hohen Füllgrades allerdings nicht geeignet. Darum wurden Isolatoren untersucht, die über einen doppeltexturierten Strunk verfügen, der neben der mikrovaristorgefüllten aus einer zusätzlichen konventionellen Silikonhülle besteht. Dieses Design konnte ebenfalls erfolgreich getestet werden, wenn die beobachteten Effekte auch nicht so deutlich ausfielen. Erste Versuche im Feld mit doppeltexturierten Strünken sind zudem in der Vorbereitung und lassen auf aussagekräftige Ergebnisse hoffen. Insgesamt erscheint der zukünftige Einsatz mikrovaristorbeschichteter Langstabisolatoren daher eine äußerst vielversprechende Option zu sein.

Mikrovaristorgefüllte Phenolharzlacke sind grundsätzlich geeignet, als resistive Feldsteuerung in einem Endenglimmschutzsystem eingesetzt zu werden. Sie zeigen sowohl elektrisch als auch thermisch ein besseres Verhalten als vergleichbare Systeme, die SiC-gefüllt sind. Mit  $E_b = 500 \text{ V/mm}$  wurde zudem ein geeigneter Schaltpunkt der Mikrovaristoren gefunden.

Der Vergleich der Endenglimmschutzlacke zu den FSE in den Kabelgarnituren zeigt außerdem, dass der Anschluss an den geerdeten Außenleiter ein wichtiger

---

Aspekt ist, der besondere Berücksichtigung erfordert. Mikrovaristorgefüllte Endenglimmschutzsysteme können wie SiC-Systeme zu hohe elektrische Feldstärken im Wickelkopfbereich einer elektrischen Maschine verhindern. Dies wurde durch Messungen des Potentials sowie durch Simulationen bestätigt. Der höhere Nicht-linearitätsexponent hat sich entgegen der Befürchtungen seitens der Maschinenhersteller nicht negativ auf das Steuerverhalten ausgewirkt. Zudem konnten mit dem verwendeten Lack generell geringere elektrische Feldstärken erreicht werden. Weiterhin konnte in thermografischen Versuchen keine thermische Instabilität der mikrovaristorgefüllten Systeme festgestellt werden. Dabei war die Erwärmung generell geringer als beim SiC-gefüllten System. Sowohl bei den Feldsteuerelementen in den Endverschlüssen als auch den Endenglimmschutzsystemen hat sich die Erwärmung der mikrovaristorgefüllten Polymere nicht negativ ausgewirkt. Während der Versuche wurde zudem kein instabiler Arbeitspunkt erreicht, der zu einem Ausfall der Systeme geführt hat. Im Rahmen dieser Arbeit konnte die Eignung mikrovaristorgefüllter Polymere für einen Dauerbetrieb allerdings nur teilweise untersucht werden. Der zuverlässige Nachweis muss bei den Garnituren und den Endenglimmschutzsystemen durch Lastwechselversuche nach den entsprechenden Normen erfolgen. Diese bilden neben den elektrothermischen Belastungen auch den mechanischen Stress durch Dehnungen während Aufwärm- und Abkühlphasen nach. Dementsprechend thermisch stabil müssen die Feldsteuersysteme sein.

Generell unterscheiden sich die Belastungen der Kabelgarnituren und der Endenglimmschutzsysteme aber stark. So sind die Nennspannungen bei elektrischen Maschinen vergleichsweise gering gegenüber den Kabelgarnituren, dagegen sind die Betriebstemperaturen in den elektrischen Maschinen wesentlich höher. Zur Beurteilung der Wirksamkeit gerade von resistiv wirkenden Feldsteuersystemen bieten sich bei allen drei untersuchten Anwendungen zunächst verschiedene Messmethoden des elektrischen Feldes und des Potentials an. Jedes System hat aber nur einen begrenzten Anwendungsbereich, da die Feldsonden einen zu starken Einfluss auf die Prüflinge haben oder nur einen limitierten Bereich darstellen können, der weit unter den real auftretenden Feldstärken liegt. Zuverlässige Messungen konnten dagegen nur bei den dünnen Anstrichen der EGS-Systeme erreicht werden. Bei den Feldsteuerelementen konnten aufgrund deren Geometrie keine aussagekräftigen Ergebnisse erzielt werden.

Gerade bei den eingesetzten Feldsteuerschläuchen und den Endenglimmschutzlacken haben sich thermografische Untersuchungen bewährt, die aufgrund der entstehenden Erwärmung deutlich zeigen können, in welchen Bereichen ein Material leitfähig wird. Sie ermöglichen vor allem eine rückwirkungsfreie Untersuchung der Prüflinge. Zudem können leicht mehrere Prüflinge miteinander verglichen werden. Ein deutlicher Effekt der nichtlinearen Kennlinie auf die Erwärmung der

mikrovaristorgefüllten Schläuche konnte nicht beobachtet werden. Sowohl bei den thermografischen Untersuchungen als auch den Feld- bzw. Potentialmessungen haben sich aber qualitative Unterschiede gezeigt, die darauf hindeuten, dass die mikrovaristorgefüllten Feldsteuerelemente im Gegensatz zu den Endenglimmschutzsystemen nicht nur resistiv sondern auch refraktiv wirken. Eine Kombination der Untersuchungsmöglichkeiten von elektrischen Feld- bzw. Potentialmesssonden mit Infrarot-Kameras kann damit besonders für resistiv wirkende Feldsteuersysteme empfohlen werden.

Die Feldmessung an einem Verbundisolator ist dagegen schwerer umzusetzen. Es konnte nur eine Feldsonde vom Typ EFA 300 eingesetzt werden, die allerdings aufgrund ihrer Dimension und ihrer maximal zulässigen Feldstärke keine Untersuchungen ermöglichte, bei denen Aussteuerungen im Bereich der Schaltpunkte erzielt werden.

In der vorliegenden Arbeit wurde erstmals eine Variation der Schaltpunkte  $E_b$  mikrovaristorgefüllter Polymere durchgeführt. Möglichst niedrige Schaltpunkte sind für den Einsatz der lokalen Feldsteuerung an Verbundisolatoren besonders interessant. Sie sind notwendig, um die benötigten Effekte bei den im Vergleich zu den Feldsteuerungen bei den Gleitanordnungen niedrigen Feldstärken zu erreichen. Daher sollten hier auch noch Schaltpunkte  $E_B < 500 \text{ V/mm}$  untersucht werden. Bei den Endenglimmschutzsystemen ist es nicht notwendig, einen gefüllten Lack mit einem höheren Schaltpunkt zu untersuchen, da der verwendete Lack mit  $E_b = 500 \text{ V/mm}$  in den durchgeführten Versuchen ein gutes Verhalten gezeigt hat. Bei den Kabelgarnituren scheint dagegen ein Schaltpunkt von  $E_b = 1200 \text{ V/mm}$  ausreichend zu sein, da er gegenüber einem geringeren Schaltpunkt kompaktere Feldsteuerelemente erlaubt. Davon unabhängig konnte gezeigt werden, dass der Einfluss der nichtlinearen Kennlinie in dieser Anwendung nicht so hoch ist, wie es beim Endenglimmschutz der Fall ist. Vielmehr stellen die mikrovaristorgefüllten Feldsteuerelemente eine Kombination von nichtlinear resistiver und refraktiver Feldsteuerung dar.

Bei den mikrovaristorgefüllten Silikonen haben sich zudem steigende Leckströme bei geringeren Schaltpunkten gezeigt. Diese bedeuten höhere Verluste. Geringere Schaltpunkte als die verwendeten sind daher nur für lokale Feldsteuerungen an Verbundisolatoren von Interesse. Sowohl bei den Endenglimmschutzsystemen als auch den Kabelendverschlüssen muss dann aber von zu hohen elektrischen Verlusten ausgegangen werden. Gleichzeitig ist kein kompakteres Design möglich.

Sowohl mikrovaristorgefüllte Kabelgarnituren als auch Endenglimmschutzsysteme müssen in einem nächsten Schritt auf ihr Langzeitverhalten geprüft werden. Dafür bieten sich in beiden Fällen sogenannte Lastwechselversuche mit erhöhter Prüfspannung an. Diese Prüfungen sollten mit Untersuchungen zum Alterungsver-



---

halten der jeweiligen gefüllten Polymere ergänzt werden. Einen interessanten Forschungsgegenstand kann zudem der Einsatz von mikrovaristorgefüllten Silikonen an Verbundhohlisolatoren darstellen. Diese werden z.B. als Hochspannungsendverschlüsse oder für Durchführungen eingesetzt und weisen beide im Vergleich zu den Langstabisolatoren vollkommen andere Feldverläufe auf. Verfügbar sind zur Zeit Endverschlüsse mit mikrovaristorgefüllten FSE mit  $U_m = 42 \text{ kV}$ . Interessant wird sein, wenn auch Hochspannungsanwendungen verfügbar sind.



# Literaturverzeichnis

- [AR10] Abd-Rahman, R; Harid, N; Haddad, A: "Stress control on polymeric outdoor insulators". In Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2010 45th International. 31 2010-sept. 3 2010, S. 1 –4.
- [AR12a] Abd-Rahman, R: "Investigations of ZnO microvaristor for stress control on polymeric outdoor insulators". Dissertation, Cardiff University, 2012.
- [AR12b] Abd-Rahman, R; et al.: "Stress control on polymeric outdoor insulators using Zinc oxide microvaristor composites". IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Band 19, Nr. 2: S. 705 –713, April 2012.
- [Bau11] Baumann, T; Hillmer, T; Hofmann, J: "Corona Protection Systems for Generators with  $U_n > 20$  kV". ETG-Workshop: Feldsteuerende Isoliersysteme, November 2011.
- [Bey86] Beyer, M; et al.: Hochspannungstechnik. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1 Auflage, 1986.
- [Bhu81] Bhushan, B; Kashyap, SC; Chopra, K: "Electrical and dielectric behavior of a zinc oxide composite". J. Appl. Phys., Band 52: S. 2932 – 2936, 1981.
- [Bla79] Blake, A; Clarke, G; Starr, W: "Improvements In Stress Control Materials". In Transmission and Distribution Conference and Exposition. April 1979, S. 264 – 270.
- [Bla15] Blatt, S; Hinrichsen, V: "Mathematical model for numerical simulation of current density in microvaristor filled insulation materials". IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Band 22, Nr. 2: S. 1161–1170, April 2015.
- [Boe01a] Boettcher, B; Malin, G; Strobl, R: "Advanced Stress Control System Based on ZnO-Technology". International Symposium on High-Voltage Engineering, 2001.
- [Boe01b] Boettcher, B; Malin, G; Strobl, R: "Stress control system for composite insulators based on ZnO-technology". In Transmission and Distribution Conference and Exposition, Band 2. 2001, Band 2, S. 776 –780.

- [Bra08] Brandes, H; Hillmer, T; Strebler, P: "Halbleitende Lacke und Bänder - für die Anwendung nützliche Ergebnisse und Eigenschaften". ETG-Workshop: Werkstoffe mit nichtlinearen dielektrischen Eigenschaften, September 2008.
- [Bri75] Brinkmann, C: Die Isolierstoffe der Elektrotechnik. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1 Auflage, 1975.
- [Chr10] Christen, T; Donzel, L; Greuter, F: "Nonlinear resistive electric field grading part 1: Theory and simulation". Electrical Insulation Magazine, IEEE, Band 26, Nr. 6: S. 47–59, November-Dezember 2010.
- [Cla99] Clarke, DR: "Varistor Ceramics". Journal of the American Ceramic Society, Band 82: S. 485–502, 1999.
- [Dan94] Danikas, M: "On the breakdown strength of silicone rubber". IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Band 1, Nr. 6: S. 1196–1200, Dezember 1994.
- [Dom08] Domininghaus, H; et al.: Kunststoffe - Eigenschaften und Anwendungen. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 8 Auflage, 2008.
- [Don04] Donzel, L; et al.: "Silicone composites for HV applications based on microvaristors". In Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD 2004)., Band 1. Juli 2004, Band 1, S. 403 – 406.
- [Don07] Donzel, L; Hagemeister, M: "Nonlinear field control of high voltage bushings". In Proceedings of the 15th International Symposium on High Voltage Engineering. August 2007, S. 119 – 122.
- [Don11] Donzel, L; Greuter, F; Christen, T: "Nonlinear Resistive Electric Field Grading Part 2: Materials and Applications". Electrical Insulation Magazine, IEEE, Band 27, Nr. 2: S. 18–29, März-April 2011.
- [Don12] Donzel, L; Hagemeister, M; Greuter, F: "Tailored Microvaristor Composites for Nonlinear Field Control". RCC-Fachtagung: Werkstoffe zur Anwendung in der elektrischen Energietechnik unter den besonderen Anforderungen der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ), 2012.
- [Eig08] Eigner, A; Semino, S: "Feldsteuertechnologien bei Kabelgarnituren - Überblick und Stand der Technik". Elektrizitätswirtschaft, Band 107, 2008.

- [Eig11] Eigner, A; Semino, S: "Electrical stress control systems in high-voltage cables and their accessories". ETG-Workshop: Feldsteuernde Isoliersysteme - Werkstoffe, Design, Prüfung und Simulation, November 2011.
- [Els00] Elsasser, O; Feser, K; Messerer, F: "Flashover behavior of semiconducting glazed insulators under positive lightning impulse stress at different climatic conditions". In Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Band 1. 2000, Band 1, S. 203–206.
- [FLI01] FLIR: Benutzerhandbuch Thermacam PM 695. FLIR Systems, 1 Auflage, 2001.
- [Gra03a] Gramesbacher, H; et al.: "Microvaristor based field grading elements for HV terminations". JICABLE 2003, conference proceedings, 2003.
- [Gra03b] Gramesbacher, H; et al.: "Microvaristor based field grading elements for HV terminations". 13th International Symposium on High Voltage Engineering, 2003.
- [Gra03c] Gramesbacher, H; et al.: "Mikrovaristoren für Feldsteuerelemente in Kabelendverschlüssen". ETG-Workshop: Silikonelatomere - Werkstoffe für Kabelgarnituren, Isolatoren, Überspannungsableiter, S. 69–72, März 2003.
- [Gre89] Greuter, F; et al.: "The metal-oxide resistor - at the heart of modern surge arresters". ABB Review, Band 1, 1989.
- [Gre90] Greuter, F; Blatter, G: "Electrical properties of grain boundaries in polycrystalline compound semiconductor". Semiconductor Science and Technology, Band 5: S. 111, 1990.
- [Gre00] Greffe, C; Gillet, F; Warnant, J: "Contribution to the electrical characterization of potential grading varnishes". Journal of Electrostatics, Band 48: S. 231–243, 2000.
- [Gre04] Greuter, F; et al.: "Microvaristors: Functional Fillers for Novel Electro-ceramic Composites". Journal of Electroceramics, Band 13: S. 739 – 744, 2004.
- [Gre10] Greuter, F: "MO-Varistors: State of the art and actual trends". CIGRE, 2010.
- [Hav00a] Haverkamp, W; Malin, G; Strobl, R: "A Novel Heat-Shrinkable Termination System for Polymeric Distribution Cable based on Ceramic Stress-grading Technology". IEEE/ICC, Insulated Conductors Committee Fall Meeting, 2000.

- [Hav00b] Haverkamp, W; Malin, G; Strobl, R: "Termination system for polymeric distribution cables based on ceramic stress-grading technology". Power Journal of the South African Institute of Electrical Engineers, 2000.
- [Hin11] Hinrichsen, V; Küchler, A: "Grundlagen der Feldsteuerung (Übersichtsvortrag)". ETG-Workshop: Feldsteuernde Isoliersysteme, November 2011.
- [Kau02] Kaufhold, M; et al.: "Interface phenomena in stator winding insulation - challenges in design, diagnosis, and service experience". Electrical Insulation Magazine, IEEE, Band 18, Nr. 2: S. 27 –36, März - April 2002.
- [Kau08] Kaufhold, M; et al.: "Characteristics of non-linear doped zinc oxide for electrical stress grading". ETG-Workshop: Werkstoffe mit nichtlinearen dielektrischen Eigenschaften, S. 87–96, 2008.
- [Küc09] Küchler, A: Hochspannungstechnik. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 3 Auflage, 2009.
- [Kel67a] Kelen, A: "On the theory of non-linear resistive field-grading coatings on insulating surfaces". Eltechnik, Band 6: S. 109 – 112, 1967.
- [Kel67b] Kelen, A; Virsberg, LG: "Discharge Suppresion on Surfaces of High-Voltage Insulation". Eltechnik, Band 4: S. 59 – 65, 1967.
- [Kem09] Kempen, S; Pohlmann, F; Pinkert, K: "Comparison of low-interaction methods of measurement for determinig the distribution of surface potential on end corona protection configurations". International Electrical Insulation Conference IET, 2009.
- [Kem11] Kempen, S; Lang, S; Pohlmann, F: "New grading material enables optimized design of end corona protection for large rotating machines". XVII International Symposium on High Voltage Engineering, August 2011.
- [Lup94] Lupo, G; et al.: "Electric field calculation in HV cable terminations employing heat-shrinkable composites with non linear characteristics". In Proceedings of the 4th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Band 1. Juli 1994, Band 1, S. 278 – 281.
- [Mer07] Merte, R: "Measurements of electric fields with an electro-optic minature probe". Proceedings of the 15th International Symposium on High Voltage Engineering, August 2007.

- [Miz99] Mizuno, Y; et al.: "Voltage and Temperature Distribution along Semiconducting Glaze Insulator Strings". IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Band 6, Nr. 1, Februar 1999.
- [Mül12] Müllegger, D: "Untersuchung und Simulation der elektrischen Eigenschaften von Mikrovaristormaterialien". Dissertation, TU München, 2012.
- [Nel84] Nelson, P; Hervig, H: "High Dielectric Constant Materials For Primary Voltage Cable Terminations". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Band 103, Nr. 11: S. 3211–3216, November 1984.
- [Pea08] Pearce, D: "Characteristics of non-linear doped zinc oxide for electrical stress grading". ETG-Workshop: Werkstoffe mit nichtlinearen dielektrischen Eigenschaften, S. 41–44, 2008.
- [Rhy97] Rhyner, J; Bou-Diab, M: "One-dimensional model for nonlinear stress control in cable terminations". IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Band 4, Nr. 6: S. 785 –791, Dezember 1997.
- [Riv98] Rivenc, JP; Bidan, P; Lebey, T: "Stress grading materials: A Discussion on lumped elements circuits validity". International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, Juni 1998.
- [Riv99] Rivenc, JP; Dinculescu, S; Lebey, T: "Suitable properties of stress grading materials". High Voltage Engineering Symposium, August 1999.
- [Rob95] Roberts, A: "Stress grading for high voltage motor and generator coils". Electrical Insulation Magazine, IEEE, Band 11, Nr. 4: S. 26 – 31, Juli 1995.
- [Sch08a] Schönecker, A: "Eigenschaften keramischer Ferroelektrika und deren Anwendungspotenzial". ETG-Workshop: Werkstoffe mit nichtlinearen dielektrischen Eigenschaften, September 2008.
- [Sch08b] Schuell, V; Schäufele, H: "Carbon Black für leitfähige Kunststoffe". ETG-Workshop: Werkstoffe mit nichtlinearen dielektrischen Eigenschaften, September 2008.
- [Sei05] Seifert, JM; Bärsch, R: "Bewertung des Kriechstreckendesigns von Silikonverbundisolatoren unter dem Aspekt von Fremdschicht-Bauartprüfungen und langjährigen Betriebserfahrungen". ETG-Fachbericht 99, S. 47–54, 2005.
- [Sei07] Seifert, JM; Bärsch, R: "Design Evaluation of Silicone Rubber Composite Insulators under the Aspect of Surface Pollution Stress". Proceedings of

- the 15th International Symposium on High Voltage Engineering, August 2007.
- [Sei11] Seifert, J; Clemens, M: "Praxis-Erfahrungen mit feldgesteuerten Verbund-Isolatoren in der Produktion und Anwendung". In ETG-Workshop: Feldsteuerende Isoliersysteme. November 2011, S. 125–133.
- [Sil13a] Silicones: Elastosil E4. Wacker Chemie AG, Burghausen, 1.2 Auflage, 2013.
- [Sil13b] Silicones: Elastosil E43. Wacker Chemie AG, Burghausen, 1.1 Auflage, 2013.
- [Sil13c] Silicones: POWERSIL 415 MH. Wacker Chemie AG, Burghausen, 1.1 Auflage, 2013.
- [Sil13d] Silicones: POWERSIL 440 MH. Wacker Chemie AG, Burghausen, 1.1 Auflage, 2013.
- [Sil13e] Silicones: SLM 70049. Wacker Chemie AG, Burghausen, 1 Auflage, 2013.
- [Sta32] Starke, H; Schröder, R: "Das elektrostatische Voltmeter". Archiv für Elektrotechnik, S. 279–282, 1932.
- [Ste03] Steinberger, H: "Elektrisch leitfähige Silikonelastomere". ETG-Workshop: Silikonelastomere - Werkstoffe für Kabelgarnituren, Isolatoren, Überspannungsableiter, S. 73–78, 2003.
- [Sto13] Stone, GC; Miller, GH: "Progress in rotating-machine insulation systems and processing". Electrical Insulation Magazine, IEEE, Band 29, Nr. 4: S. 45–51, July 2013. ISSN 0883-7554.
- [Str00] Strobl, R; Hverkamp, W; Malin, G: "I(O)XSU - Neue Generation wärmeschrumpfender Mittelspannungsendverschlüsse basierend auf ZnO-Technologie". Elektrizitätswirtschaft, Band 26, 2000.
- [Str01a] Strobl, R; et al.: "Evolution of stress control systems in medium voltage cable accessories". In IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2001, Band 2. 2001, Band 2, S. 843 –848.
- [Str01b] Strobl, R; et al.: "Medium voltage terminations using an advanced stress control technology". In IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Band 2. 2001, Band 2, S. 771 –775.



- [Str01c] Strobl, R; et al.: "Metal oxide matrix-cold applied elastomeric termination systems". In Petroleum and Chemical Industry Conference, 2001. IEEE Industry Applications Society 48th Annual. 2001, S. 233 –240.
- [Str03] Strauch, G; Kaumanns, J: "Extrudierte Muffen aus SiR für 12 - 36 kV". ETG-Workshop: Silikonelastomere - Werkstoffe für Kabelgarnituren, Isolatoren, Überspannungsableiter, S. 37–44, 2003.
- [Sys13] Systems, O: DayCor SUPERB. CMV hoven GmbH, CMV hoven GmbH, 1 Auflage, 2013.
- [Thi64] Thienpont, J; Sie, T: "Suppression of surface discharges in the stator windings of high voltage machines". Conference International des Grandes Reseaux electriques e Haute Tension, Juni 1964.
- [Tom90] Tomanek, A: Silicone und Technik. Carl Hanser Verlag, 1 Auflage, 1990.
- [Wan96] Wandmacher, RA; et al.: "New silicone cold shrink termination". In Proceedings of IEEE Transmission and Distribution Conference. September 1996, S. 391–395.
- [Was94] Waser, R: Varistoren. Hanno Schaumburg B.G. Teuber, Stuttgart, 1 Auflage, 1994.
- [Wei08a] Weida, D; Steinmetz, T; Clemens, M: "Electro-Quasistatic High-Voltage Field Simulations of Insulator Structures Covered with Thin Resistive Pollution or Nonlinear Grading Material". In Proceedings of the 2008 IEEE International Power Modulators and High Voltage Conference. 2008, S. 580–583.
- [Wei08b] Weida, D; et al.: "Electro-Quasistatic High-Voltage Field Simulation of Large Scale 3D Insulator Structures Including 2D Models for Conductive Pollution Layers". In Advanced Computer Techniques in Applied Electromagnetics. 2008, S. 431–437.
- [Wei08c] Weißenberg, W: "Feldsteuertechnik in Kabelgarnituren und Durchführungen - Stand und Entwicklungstendenzen". ETG-Workshop: Werkstoffe mit nichtlinearen dielektrischen Eigenschaften, S. 75–86, 2008.
- [Wei09] Weida, D; Steinmetz, T; Clemens, M: "Electro-Quasistatic High Voltage Field Simulations of Large Scale Insulator Structures Including 2-D Models for Nonlinear Field-Grading Material Layers". IEEE Transactions on Magnetics, Band 45, Nr. 3: S. 980–983, 2009.

- [Wei10] Weida, D; Böhmelt, S; Clemens, M: "Design of ZnO microvaristor end corona protection for electrical machines". In Electrical Insulation (ISEI), Conference Record of the 2010 IEEE International Symposium on. 2010, S. 1–4.
- [Wei11a] Weida, D: "Optimierung von Applikationen aus der Hochspannungstechnik mit dünnen Schichten aus mikrovaristorgefüllten Polymeren mit Hilfe von nichtlinearen transienten 3D Simulationen". Dissertation, Fachbereich Elektrotechnik, Informationstechnik, Medientechnik der Bergischen Universität Wuppertal, November 2011.
- [Wei11b] Weida, D; Richter, C; Clemens, M: "Design of ZnO microvaristor material stress-cone for cable accessories". IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Band 18, Nr. 4: S. 1262–1267, 2011.
- [Wei11c] Weidner, JR; Staubach, C; Schmidt, G: "Elektrische Feldsteuerungen bei Ständerwicklungen von Turbogeneratoren - Anforderungen, Berechnungsverfahren, Konstruktion, Betriebsverhalten". ETG-Workshop: Feldsteuernde Isoliersysteme, November 2011.
- [Win03] Winter, HJ: "Dielektrische Eigenschaften von Silikonelastomeren als Isolierstoffe". Silicone, 2003.

# Eigene Veröffentlichungen

Die folgenden Veröffentlichungen sind im Rahmen des Forschungsprojektes mit Beteiligung des Autors entstanden.

- [Deb09a] Debus, JO; Hinrichsen, V: "Eigenschaften von mikrovaristorgefüllten Polymeren für Isoliersysteme in der elektrischen Energietechnik". RCC Fachtagung: Werkstoffe - Forschung und Entwicklung neuer Technologien zur Anwendung in der elektrischen Energietechnik, Mai 2009.
- [Deb09b] Debus, JO; Hinrichsen, V: "Untersuchung des Verhaltens von mikrovaristorgefülltem Silikon unter mechanischer Beanspruchung". RCC Fachtagung: Werkstoffe - Forschung und Entwicklung neuer Technologien zur Anwendung in der elektrischen Energietechnik, Juni 2009.
- [Deb10] Debus, JO; et al.: "Investigation of composite insulators with microvaristor filled silicone rubber components". International Conference on Solid Dielectrics (ICSD), Juli 2010.
- [Deb11a] Debus, JO; Hinrichsen, V: "Microvaristor Filled Stress Grading Systems For High-Voltage Rotating Electrical Machines". 22nd Nordic Insulation Symposium, Juni 2011.
- [Deb11b] Debus, JO; Hinrichsen, V; Seifert, JM: "Improved Performance of Silicone Rubber Composite Insulators by Micro-Varistor Filled Components". ISH 2011, August 2011.
- [Deb11c] Debus, JO; Tenzer, M; Hinrichsen, V: "Verbundlangstabilisatoren mit mikrovaristorgefüllten Silikonelementen". 3. Burghauser Isolierstoff-Kolloquium, Juni 2011.
- [Sei08] Seifert, JM; et al.: "Einsatz von Feldsteuermaterialien in Hochspannungs-isolatoren - Potentiale und Risiken". ETG Workshop : Werkstoffe mit nichtlinearen dielektrischen Eigenschaften, März 2008.
- [SF13] Schulte-Fischedick, J; et al.: "Electric field grading using insulators with microvaristor filled silicon rubber". Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD 2013)., 2013.

- [Ten10] Tenzer, M; Debus, J; Hinrichsen, V: "Mikrovaristorgefüllte Isoliersysteme bei Gleichspannungsbeanspruchung". ETG Fachtagung - Isoliersysteme bei Gleich- und Mischfeldbeanspruchung, September 2010.

# Normen

Folgende Normen wurden für die vorliegende Arbeit verwendet

- [IEC 60034-1]      60034-1, IEC: *Rotating electrical machines - Part 1: Rating and performance*. Februar 2010
- [IEC 60060-1]      60060-1, IEC: *High voltage test techniques - Part 2: General definitions and test requirements*. September 2010
- [IEC 60060-2]      60060-2, IEC: *High voltage test techniques - Part 2: Measuring systems*. November 2010
- [IEC 60071-1]      60071-1, IEC: *Insulation coordination - Part1: Definitions, principles and rules*. Januar 2006
- [IEC 60093]      NORM, IEC 6.: *Methods of test for volume resistivity and surface resistivity of solid electrical insulating materials*. Januar 1980
- [IEC 60243-1]      60243-1, IEC: *Electric strength of insulating materials - Test methods - Part 1: Tests at power frequencies*. Maerz 2013
- [IEC 60243-2]      60243-2, IEC: *Electric strength of insulating materials - Test methods - Part 2: Additional requirements for tests using direct voltage*. Februar 2001
- [IEC 60250]      60250, IEC: *Recommended methods for thr determination of the permittivity and dielectric dissipation factor of electrical isulating materials at power, audio and radio frequencies including metre wavelengths*. Januar 1969
- [IEC 60587]      60587, IEC: *Electrical insulating materials used under severe ambient conditions - Test methods for evaluating resistance to tracking and erosion*. Mai 2007
- [IEC 60815-3]      (ENTWURF), IEC 60815-3: *Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions - Part 3: Polymer insulators for a.c. systems*. Juli 2007

- [IEC 60840] 60840, IEC: *Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 30 kV ( $U_m = 36\text{kV}$ ) up to 150 kV ( $U_b = 170\text{kV}$ ) - Test methods and requirements*. November 2011
- [IEC 61109] 61109, IEC: *Insulators for overhead lines - Composite suspension and tension insulators for a.c. systems with a nominal voltage greater than 1 000 V - Definitions, test methods and acceptance criteria*. Mai 2008
- [IEC 61621] 61621, IEC: *Dry, solid insulating materials - Resistance test to high-voltage, low-current arc discharges*. September 1997
- [IEC 62217] 62217, IEC: *Polymeric insulators for indoor and outdoor use with a nominal voltage  $>1000\text{ V}$  - General definitions, test methods and acceptance criteria*. Oktober 2012
- [IEC/TS 62073] 62073, IEC/TS: *Guidance on the measurement of wettability of insulator surface*. Juni 2003

# Studentische Arbeiten

Folgende studentische Arbeiten sind im Rahmen des Forschungsprojektes entstanden. Der Autor bedankt sich für das ausgezeichnete Engagement der Bearbeiter.

- [Ack11] Ackermann, T: "Untersuchung von Verbundisolatoren mit unterschiedlichen Silikonhüllen". Bachelorarbeit, TU Darmstadt, April 2011.
- [Dha13] Dhanraj, VG: "Investigation of partial discharge behavior and the breakdown voltage of micorovaristor filled Silicone". Masterarbeit, TU Darmstadt, April 2013.
- [Dür09] Dürr, SE: "Untersuchung von mikrovaristorgefüllten Silikonen unter mechanischer Beanspruchung". Studienarbeit, TU Darmstadt, November 2009.
- [Dra12] Draude, M: "Optimierte Feldsteuerungen in Mittelspannungskabelgarnituren". Diplomarbeit, TU Darmstadt, April 2012.
- [Gie12] Gießel, M: "Untersuchung der elektrischen Potentialverteilung an optimierten Verbundisolatoren mit mikrovaristorgefüllten Silikonelementen". Diplomarbeit, TU Darmstadt, Oktober 2012.
- [Gor12] Gorzegno, G: "Untersuchung des Alterungsverhaltens mikrovaristorgefüllter Prüflinge". Masterarbeit, TU Darmstadt, Juli 2012.
- [Jäg12] Jäger, RM: "Simulation mikrovaristorgefüllter Endenglimmschutzsysteme mit Ansoft Simplorer". Bachelorarbeit, TU Darmstadt, April 2012.
- [Kes13] Kessler, M: "Untersuchung von mikrovaristorgefüllten Feldsteuerungen in Kabelgarnituren für Mittelspannungsnetze". Studienarbeit, TU Darmstadt, März 2013.
- [Koc10] Koch, P: "Messung des Potentialverlaufs an Wicklungsstabmodellen mit mikrovaristorgefüllter Feldsteuerung". Bachelorarbeit, TU Darmstadt, August 2010.
- [Leb09] Lebordais, R: "Aufbau und Inbetriebnahme eines computergesteuerten Messplatzes zur Charakterisierung von mikrovaristorgefüllten Prüflingen". Masterarbeit, TU Darmstadt, Februar 2009.

- [Pro13] Prochaska, JO: "Aufbau und Inbetriebnahme eines Versuchsstands zur Ermittlung des Impuls-energieaufnahmevermögens mikrovaristorgefüllter Polymere". Studienarbeit, TU Darmstadt, Februar 2013.
- [Prz12] Przybilla, T: "Simulation mikrovaristorgefüllter Feldsteuerelemente in Mittelspannungsgarnituren". Bachelorarbeit, TU Darmstadt, Oktober 2012.
- [Pso10] Psotta, T: "Aufbau und Inbetriebnahme eines Versuchsstandes zur thermischen Alterung mikrovaristorgefüllter Prüflinge". Studienarbeit, TU Darmstadt, März 2010.
- [Sur11] Surges, B: "Untersuchung des thermischen Verhaltens mikrovaristorgefüllter Endenglimmschutzsysteme". Bachelorarbeit, TU Darmstadt, November 2011.
- [Thi10a] Thiel, D: "Evaluation der grundlegenden Eigenschaften von mikrovaristorgefülltem Silikon in Verbundisolatoren". Studienarbeit, TU Darmstadt, Juli 2010.
- [Thi10b] Thiel, D: "Untersuchung der Einsetzmöglichkeiten von mikrovaristorgefüllten Silikonen in Verbundisolatoren". Bachelorarbeit, TU Darmstadt, Januar 2010.



## A. Aufgebaute Prüflinge

### A.1. Prüflinge zur Charakterisierung

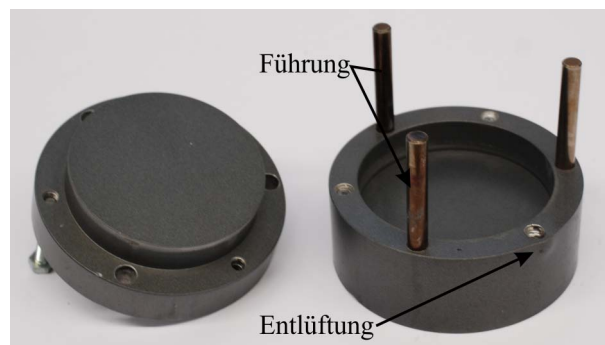


Abbildung A.1.: Form zur Herstellung der plattenförmigen Prüflinge

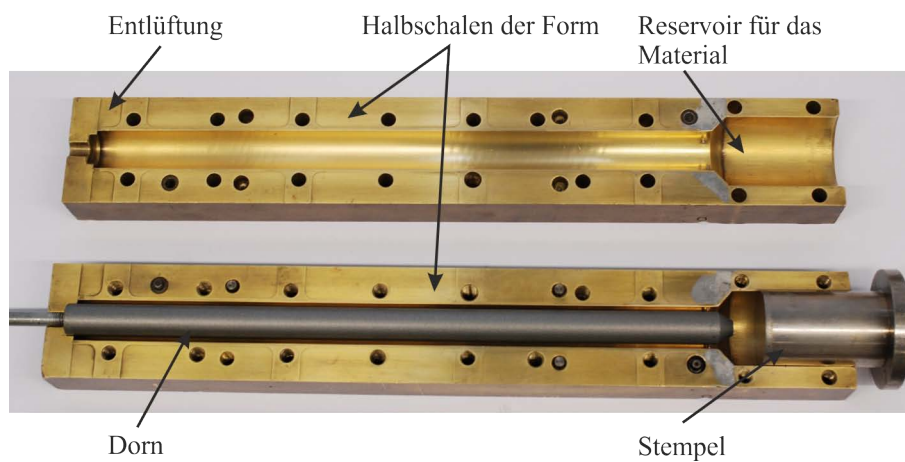


Abbildung A.2.: Form zur Herstellung der schlauchförmigen Prüflinge



Abbildung A.3.: Beispiel einer mikrovaristorgefüllten Silikonplatte aus Abschnitt 6.2 mit einem Durchmesser  $D = 100 \text{ mm}$  und einer Dicke  $a = 2 \text{ mm}$



Abbildung A.4.: Mikrovaristorgefüllter Prüfling des Types A-1000 für den Schiefebene-Test in Abschnitt 6.3.3 . Die Prüflinge haben eine Dimension von  $122 \text{ mm} \times 52 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$

## A.2. Aufgebaute Verbundisolatoren



Abbildung A.5.: Ergänzung zu Abschnitt 7.1: Mikrovaristorgefüllter Silikonschirm, der rechts mit dem verwendeten Silikonkleber bestrichen ist. Ein Unterschied der Hydrophobie zeigt sich nicht. Die Hydrophobieklasse des Materials wird als WC 1 - 2 bestimmt.

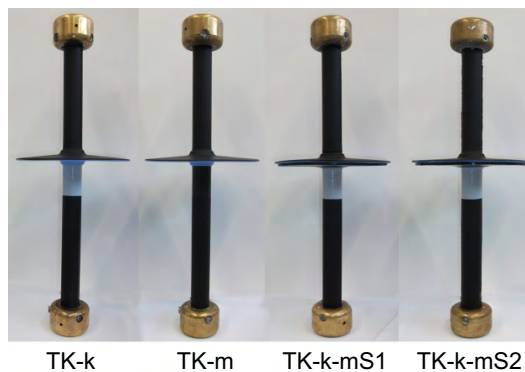


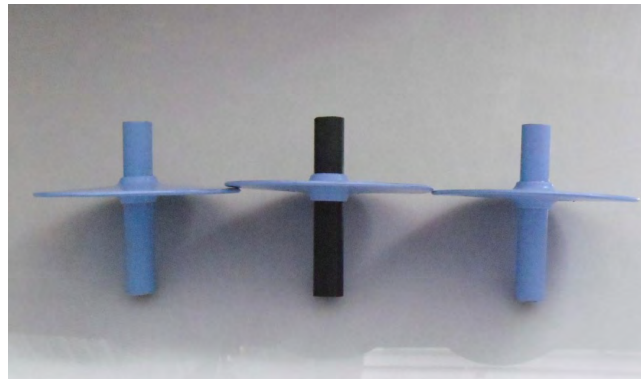
Abbildung A.6.: Aufgebaute Modellisolatoren zur Untersuchung des Trockenzonenüberschlages in Abschnitt 7.2.1.2



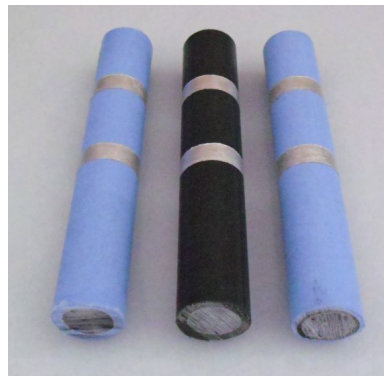
Abbildung A.7.: Beispiel eines konventionellen Silikonschirms, der mit einer mikrovaristorgefüllten Silikonplatte unterklebt wurde



Abbildung A.8.: Die Isolatoren SK-de1 und SK-de2 für einen 1000-h-Versuch in einer Salznebelkammer nach Abschnitt 7.2.1.4



(a)



(b)

Abbildung A.9.: Prüflinge für Kennlinienmessungen in Abschnitt 7.2.1.3 mit Modellanordnungen in Öl: (a) mit Schirm (Anordnung 1), (b) mit Silberleitlackelektroden (Anordnung 2)

### A.3. Prüflinge zur Untersuchung mikrovaristorgefüllter Kabelgarnituren



Abbildung A.10.: Aufgebaute Kabelstrecken, die für die Untersuchungen in Kapitel 9 verwendet werden; Oben: Prüflinge der Stoßspannungsprüfungen; Unten: Verwendete Mittelspannungsgarnituren

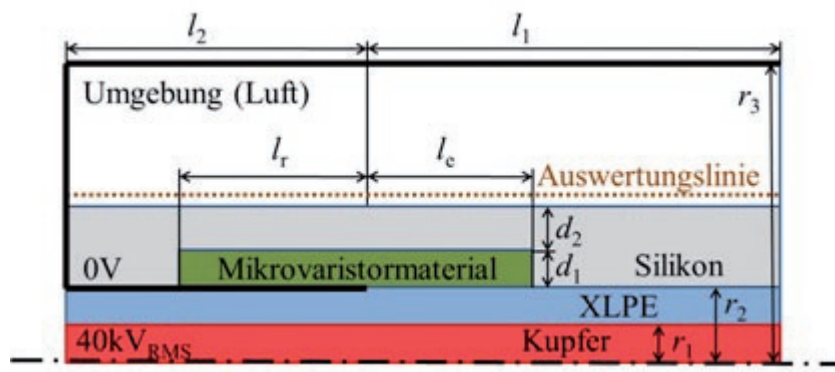


Abbildung A.11.: Von [Wei11b] für Simulationsrechnungen verwendetes Kabelmodell (siehe Abschnitt 4.4)

Tabelle A.1.: Übersicht über die im Rahmen der Arbeit untersuchten Verbundisolatoren mit  $U_m = 170 \text{ kV}$ . Die mikrovaristorgefüllten Strünke vom Typ ee und DE verfügen über  $E_b = 1200 \frac{\text{kV}}{\text{cm}}$ ; jene vom Typ de über  $E_b = 500 \frac{\text{kV}}{\text{cm}}$ .

Typ	Schirme konv. + mVar.	Strunk	$l_s$ in mm	$l_k$ in mm	Anmerkungen
170k-k	17 + 0	ee, konv.	1385	3400	Industriell gefertigt
170m-km-1	11 + 6	ee, mVar.	1385	3400	mVar-Schirme HS-seitig
170k-km-1	11 + 6	ee, konv.	1385	3400	mVar-Schirme HS-seitig
170m-km-2	8 + 9	ee, mVar.	1385	3400	Schirme alternierend
170k-km-2	8 + 9	ee, konv.	1385	3400	Schirme alternierend
170m-k-1	17 + 0	ee, mVar.	1385	3400	Armatur versiegelt
170m-k-2	17 + 0	ee, mVar.	1385	3400	Galvanisch angeschlossen
170k-k-3	7 + 0	ee, konv.	1350	2030	Kriechweg reduziert
170m-k-3	7 + 0	ee, mVar.	1350	2030	Kriechweg reduziert
170m	7 + 0	ee, konv.	1350	2030	reiner Strunk
170k	7 + 0	ee, mVar.	1350	2030	reiner Strunk
170DE-k-1	7 + 0	DE, mVar.	1350	2030	doppeltextrudiert
170k-km-3	3 + 4	ee, konv.	1350	2030	Schirme sind mit mVar-Platte unterklebt
170de-k-1	7 + 0	de, mVar.			

Typ	Schirme konv. + mVar.	Strunk	Länge $l_i$	Schlagweite $s$	Kriechweg $l_k$	$E_b$ in V/mm
420m-mk	5 + 5	ee, mVar.	2760 mm	2760 mm	3910 mm	1200
420k-mk	5 + 5	ee, konv.	2760 mm	2760 mm	3910 mm	1200
420k-k	10 + 0	ee, konv.	2760 mm	2780 mm	3910 mm	-
420m-k	10 + 0	ee, mVar.	2760 mm	2780 mm	3910 mm	1200
420k	keine	ee, konv.	2760 mm			-
420m	keine	ee, mVar.	2760 mm			1200
420DE	10 + 0	DE, mVar.	2750 mm	2780 mm	3960 mm	1200
420k-k-2	10 + 0	ee, konv.	2750 mm	2780 mm	3960 mm	-
420de-k-1	34 + 0	de, mVar.	2750 mm	2780 mm	0 mm	1200
420de-k-2	34 + 0	de, mVar.	2750 mm	2780 mm	0 mm	500
420k-k-3	34 + 0	ee, konv.	2750 mm	2780 mm	0 mm	-

Tabelle A.2.: Aufgebaute Verbundisolatoren mit  $U_m = 420$  kV



Tabelle A.3.: Einzelne Spannungen bei der Bestimmung der Überschlagspannung bei Wechselspannung an Modellisolatoren in Abschnitt 7.2.1.2

Versuch	TM-k $\hat{u}_{d-n}$ in kV	TM-m $\hat{u}_{d-n}$ in kV	TM-k-mS1 $\hat{u}_{d-n}$ in kV	TM-k-mS2 $\hat{u}_{d-n}$ in kV	
1	51,9	57,3	57,5	50,4	
2	51,1	57,9	57,7	48,4	
3	50,6	51,8	56,4	46,6	
4	51,4	57,9	56,2	51,9	51,9
5	50,7	59,6	57,2	53,6	53,6
6	51,5	52,8	56,5	53,4	53,4
7	51,1	60,3	59,4	55,2	55,2
8	49,7	58,1	58,9	52,7	52,7
9	54,1	61,6	57,3	55,7	55,7
10	52,3	57,6	59,8	57,4	57,4
11	54,1	55,8	58,2	59,1	59,1
12	56,0	58,1	57,1	59,6	59,6
13	54,9	61,2	58,8	59,5	59,5
14	55,0	60,8	58,7	58,5	58,5
15	55,7	60,7	60,6	60,2	60,2
$\hat{u}_{d-50}$ in kV	52,7	58,1	58,0	54,8	56,4
$\sigma$ in kV	2,0	2,8	1,3	4,1	2,9

Tabelle A.4.: Daten der Modelle, die in Abschnitt 7.2.1.4 in der Salznebelkammer untersucht wurden

<b>Prüfling</b>	<b>Strunk</b>	<b>Schirme</b>	<b>Kriechweg <math>l_k</math> in mm</b>
SK-m-mS1	mVar.	4 mVar. unterklebt	785
SK-m-mS2	mVar.	3 mVar. unterklebt	665
SK-k-mS	konv.	4 mVar. unterklebt	785
SK-m1	mVar.	4	785
SK-m3	mVar.	3	665
SK-k1	konv.	4	785
SK-m2	mVar.	4	785
SK-k2	konv.	4	785
SK-d1	de	4	770
SK-d2	de	4	770

## B. Prüfaufbauten und -parameter

### B.1. Prüfaufbauten zur Charakterisierung

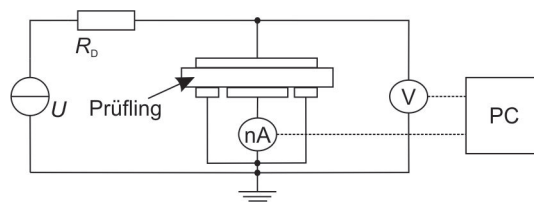


Abbildung B.1.: Schaltbild des verwendeten Gleichspannungsmesskreises zur Charakterisierung der mikrovaristorgefüllten Prüflinge

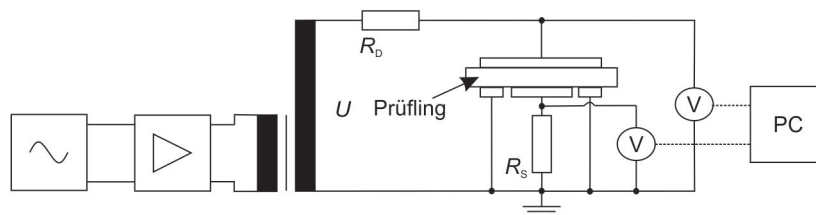


Abbildung B.2.: Schaltbild des verwendeten Wechselspannungsmesskreises zur Charakterisierung der mikrovaristorgefüllten Prüflinge



Abbildung B.3.: Anordnung zur Messung des Mikrovaristor-Pulvers in einem nichtviskosen Öl in Abschnitt 6.1



Abbildung B.4.: Durchführung des Schiefe-Ebene-Tests in Abschnitt 6.3.3 mit einem exemplarischen Prüfling vom Typ A-1000. Der Elektrolyt läuft an der Unterseite herunter.



Abbildung B.5.: Feldsonde EFA-300 der Firma Narda Solutions GmbH

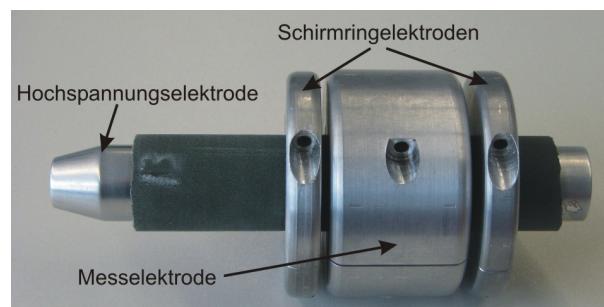


Abbildung B.6.: Ergänzung zu 6.3.1: Messanordnung mit zwei Schirmringen,  $D_i = 23 \text{ mm}$ ,  $D_a = 28,6 \text{ mm}$  zur radialen Kennlinienbestimmung von schlauchförmigen Prüflingen

## B.2. Prüfaufbauten zur Untersuchung der Verbundlangstabisolatoren



Abbildung B.7.: Aufbau der Beregnungsversuche in Abschnitt 7.2.4 und 7.2.3. Legende: 1: Beregnungsanlage, 2: Trafokaskade, 3: Dämpfungswiderstand, 4: Kapazitiver Messteiler, 5: Nachbildung der geerdeten Masttraverse, 6: Isolatorprüfling, 7: Leiterseilnachbildung ( $L_{\text{Leiter}} = 6,5 \text{ m}$ ,  $D_{\text{Leiter}} = 110 \text{ mm}$ ) (Quelle: [Ack11]).

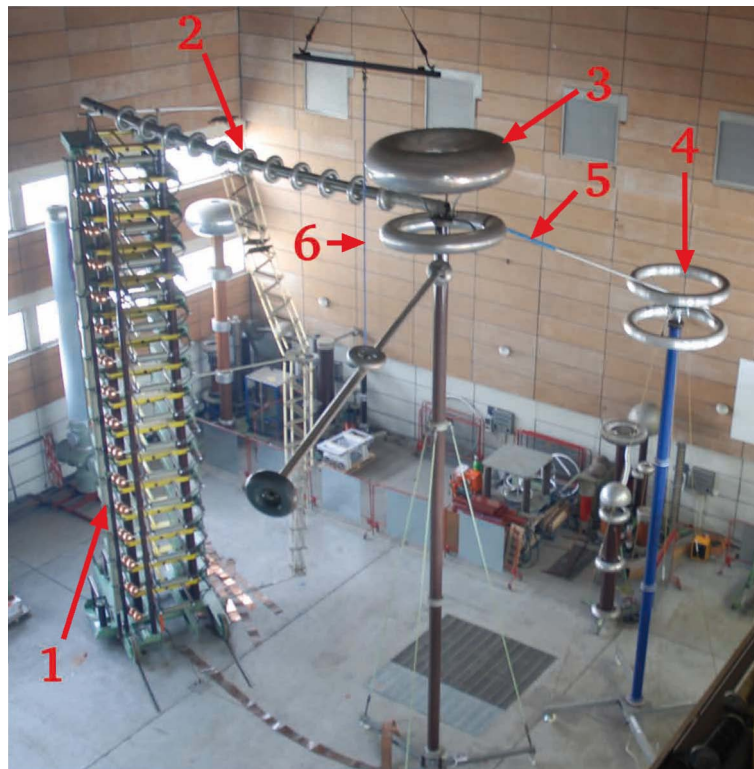


Abbildung B.8.: Aufbau der Stoßspannungsversuche (in Abschnitt 7.3.2. Legende: 1: Marx'scher Stoßspannungsgenerator, 2: überbrückter Dämpfungswiderstand, 3: Belastungskapazität und Messteiler für Schaltstoßspannungen, 4: Messteiler für Blitzstoßspannungen, 5: Dämpfungswiderstand, 6: Isolatorprüfling (Quelle: [Ack11])).

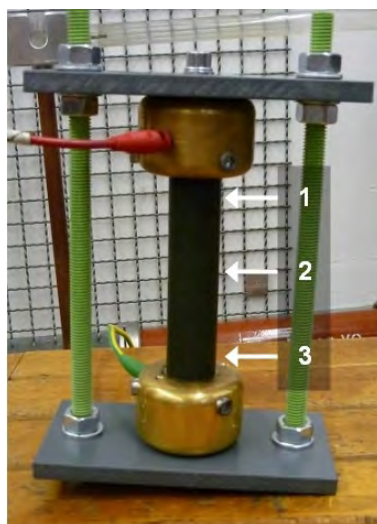


Abbildung B.9.: Aufbau zur Untersuchung der Erwärmung eines massiven Prüflings aus SLM79049. Eingezeichnet sind die drei Messpunkte, die mit der Infrarotkamera ausgewertet werden.





Abbildung B.10.: Aufbau in der Salznebelkammer der Isolatoren nach Tabelle A.4;  
Untersuchungen siehe Abschnitt: 7.2.1.4

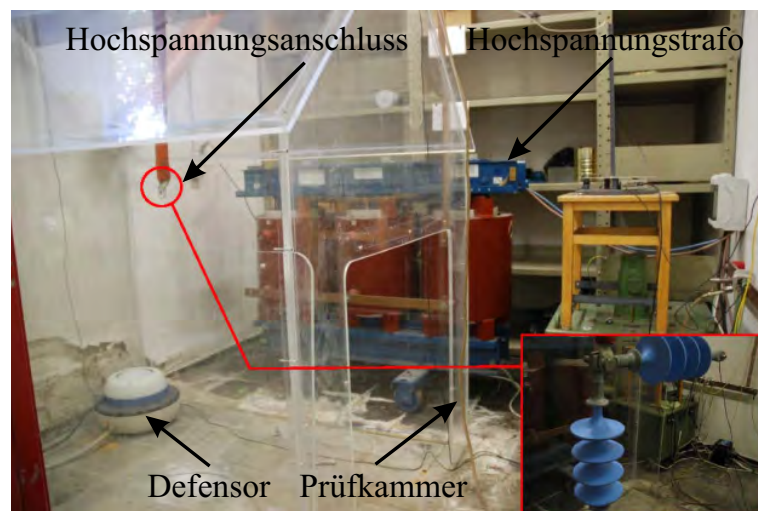


Abbildung B.11.: Aufbau der Salznebelkammer, in der die Isolatoren SK-de1 und  
SK-de2 geprüft werden; Untersuchungen siehe Abschnitt: 7.2.1.4



Abbildung B.12.: Aufstellung der Verbundisolatoren mit  $U_m = 170 \text{ kV}$  zum 1000 h-Versuch in der Salznebelkammer in Abschnitt 7.2.2



### B.3. Aufbauten zur Untersuchung von Mittelspannungskabelgarnituren

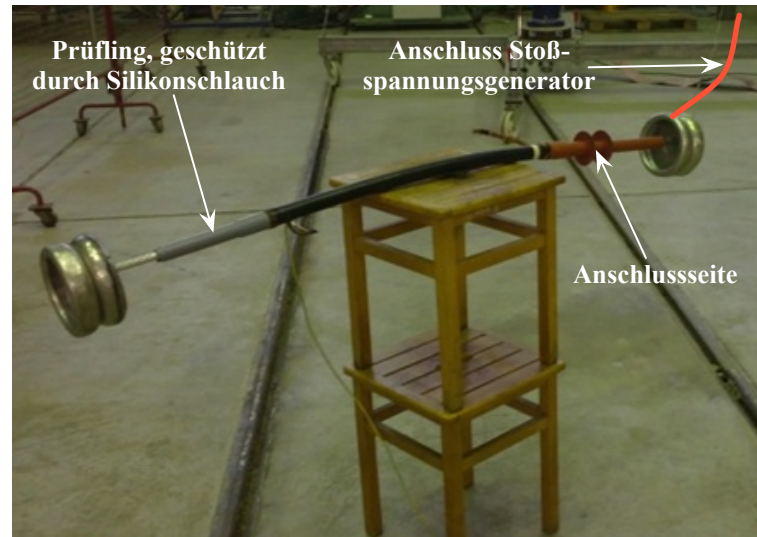


Abbildung B.13.: Aufbau der Stoßspannungsversuche an FSE in Abschnitt 9.3. Die einzelnen Prüflinge sind durch zusätzliche Silikonschläuche geschützt.

## B.4. Prüfaufbauten zur Untersuchung der Endenglimmschutzsystem

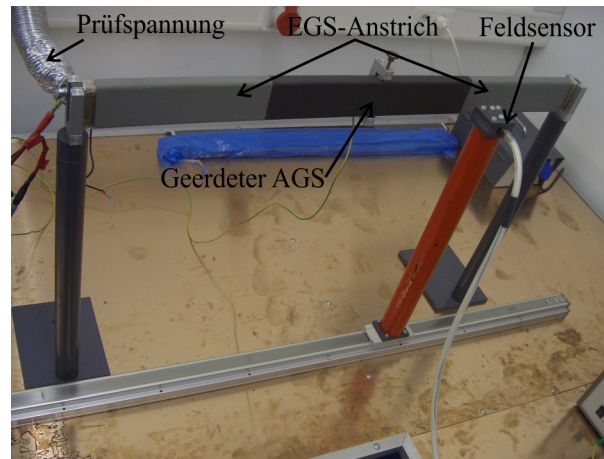


Abbildung B.14.: Beispiel einer verwendeten Prüfstrecke für Untersuchungen der Wicklungsstäbe im Aufbau der Potentialmessung mit dem elektrostatischen Voltmeter TREK 341B

Tabelle B.1.: Technische Daten des in Abschnitt 8.2.1 verwendeten elektrostatischen Voltmeters TREK 341B

Hersteller:	TREK, Inc.
Typ:	341B
Messbereich $U_{\text{Mess,DC}}$	0–20 kV
Genauigkeit auf den ganzen Bereich:	$\pm 0,1 \%$
Antwortzeit $t_{\text{ans}}$ :	$< 200 \mu\text{s}$ für 1 kV $< 5 \text{ ms}$ für 20 kV
Bandbreite $f_{\text{Band}}$ :	0–25 Hz
$\ddot{u}$ :	1000:1
Dimension Sonde $b \times h \times l$ :	11,8 mm $\times$ 11,1 mm $\times$ 76,2 mm
$d_{\text{Abs}}$	$\geq 3 \text{ mm}$



Abbildung B.15.: In Abschnitt 8.2.1 verwendetes Starke-Schröder-Voltmeter

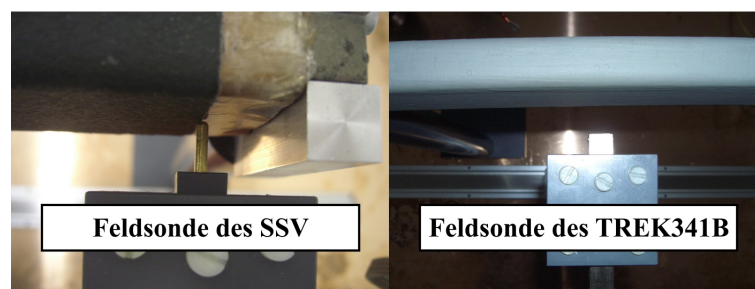


Abbildung B.16.: Messung des Oberflächenpotentials an einem Wicklungsstab mit dem Sensor des TREK 341B (links) und dem Starke-Schröder-Voltmeter (rechts). Zu beachten ist, dass beim SSV im Gegensatz zum TREK341B direkt auf der Oberfläche gemessen werden kann.



Abbildung B.17.: Aufbau der thermografischen Messungen an den Wicklungsstabmodellen, die in Abschnitt 8.3 gezeigt werden



Abbildung B.18.: Prüfstand zur Messung der elektrischen Feldverteilung am Lehrstuhl für Hochspannungstechnik der TU Dortmund mit Hilfe eines Pockels-Sensors (Siehe: Abschnitt 8.2.1)

Tabelle B.2.: Technische Daten des in Abschnitt 8.2.1 verwendeten Starke-Schröder Voltmeters

Hersteller:	Trüb, Täuber u. Co.
Messbereich $U_{\text{Mess}}$	0–30 kV
$C$ bei $d_{\text{Elektroden}} = 4 \text{ mm}$	3,6 pF
$C$ bei $d_{\text{Elektroden}} = 11 \text{ mm}$	2,6 pF
$C$ bei $d_{\text{Elektroden}} = 22 \text{ mm}$	2 pF

Tabelle B.3.: Technische Daten der in Abschnitt 7.2 verwendeten UV Kamera [Sys13]

Hersteller:	OFIL Systems
Typ:	DayCor SUPERB
Auflösung bei $l_{\text{Mess}} = 10 \text{ m}$	1,3 pC
Empfindlichkeit	$3 \cdot 10^{-18} \text{ W cm}^2$
Minimaler Fokus	0,5 m
Zoom UV	2
Spektralbereich	240–280 nm
$T_{\text{Betrieb}}$ :	–20 – 55 °C

Tabelle B.4.: Technische Daten der verwendeten Feldsonde EFA-300

Hersteller:	Narda Safty Solution GmbH
Typ:	EFA-300
$l_{\text{Kante der Messflächen}}$	8 cm
Maße $l \times b \times h$ :	10,5 cm $\times$ 10,5 cm $\times$ 10,5 cm
Genauigkeit	$\pm 4 \%$ bezogen auf den Messwert
Minimaler Fokus	0,5 m
Messbereich	0,01 – 100 kV/m
$E_{\text{max}}$	200 kV/m
Frequenzbereich	0,005 – 32 kHz

Tabelle B.5.: Technische Daten der IR Kamera Thermacam PM 695 [FLI01]; Diese wurde in den Abschnitten 8.3 und 9.4 eingesetzt.

Hersteller:	FLIR Systems
Typ:	Thermacam 695
Empfindlichkeit	$< 0,08 \text{ °C}$ bei $30 \text{ °C}$
Minimaler Fokus	0,5 m
Zoom UV	2
Genauigkeit:	$\pm 2 \%$
Spektralbereich	7,5–13 $\mu\text{m}$
$T_{\text{Mess}}$ : Bereich 1	–20 – 120 °C
$T_{\text{Mess}}$ : Bereich 2	0 – 500 °C

Tabelle B.6.: Technische Daten der IR Kamera Infratec, die in Abschnitt 8.3 eingesetzt wurde

Hersteller:	Infratec
Typ:	VarioCAM hr head
Empfindlichkeit	$< 0,04\text{ °C}$ bei $30\text{ °C}$
Minimaler Fokus	0,5 m
Zoom UV	2
Genauigkeit:	$\leq 2\%$ bei $30\text{ °C}$
Spektralbereich	$7,5\text{--}14\text{ }\mu\text{m}$
$T_{\text{Mess}}$ : Bereich 1	$-40\text{ -- }1200\text{ °C}$

## C. Weitere Ergebnisse

### C.1. Ergänzende Ergebnisse zu Kapitel 6

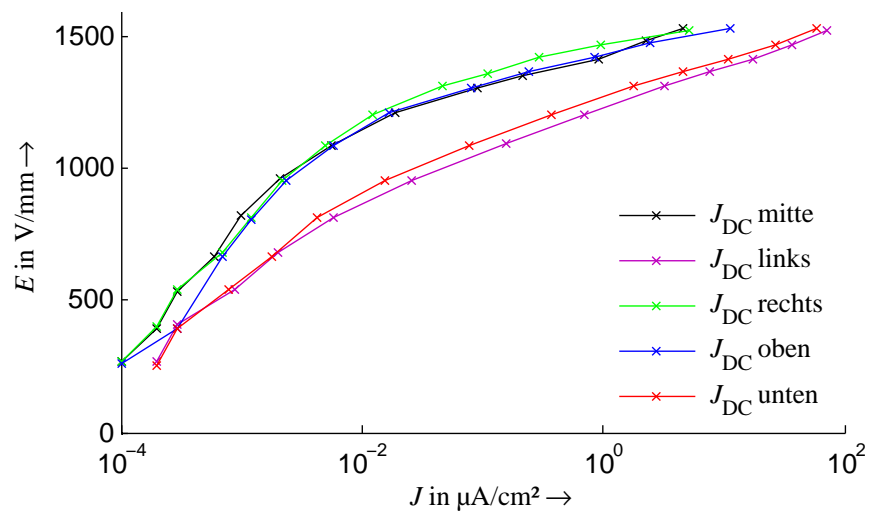


Abbildung C.1.: Homogenitätsmessung an einem weiteren Prüfling vom Typ A-1200; Ergänzung zu Abschnitt 6.4.1

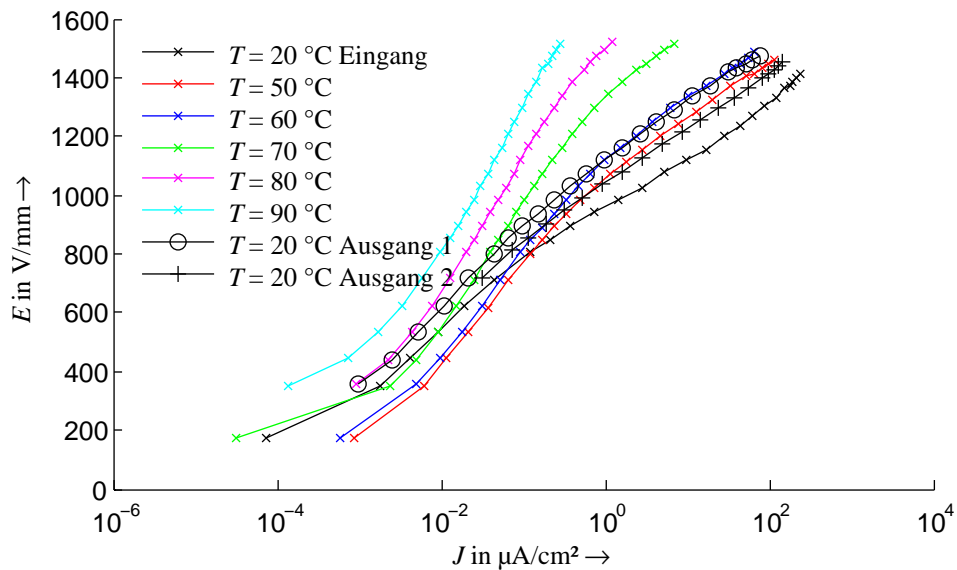


Abbildung C.2.: Temperaturabhängige  $E$ - $J$ -Kennlinie, aufgenommen bei Gleichspannung an einer mikrovaristorgefüllten Silikonplatte vom Typ A-1200; Ergänzung zu Abschnitt 6.3.2

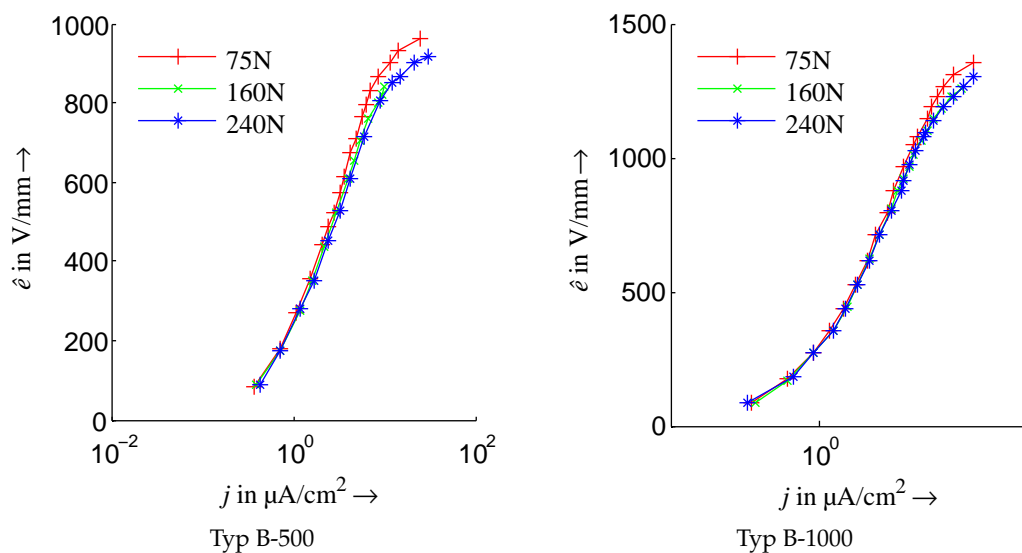


Abbildung C.3.: Untersuchungen zum Einfluss der Anpresskraft auf die  $\hat{e}$  –  $j$ -Kennlinie an zwei Silikonplatten der Typen B-500 und B-1000 mit der Elektrodenanordnung Typ 1 nach Tabelle 6.1



## C.2. Ergänzende Ergebnisse zu Kapitel 7

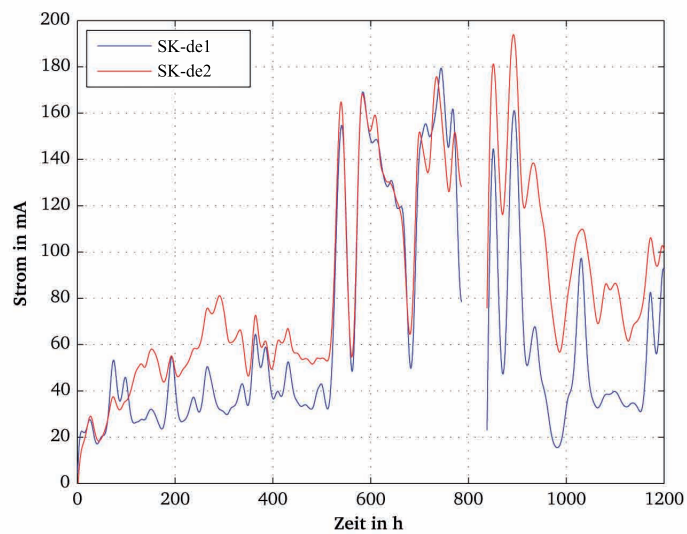


Abbildung C.4.: Ableitströme der Isolatormodelle SK-de1 und SK-de2 bei  $U_p = 22,3$  kV während der Prüfung in einer Salznebelkammer (siehe Abschnitt 7.2.1.4)



Abbildung C.5.: Durchschlagkanal des Prüflings MI-de-2 (siehe Abschnitt 7.2.1.3)

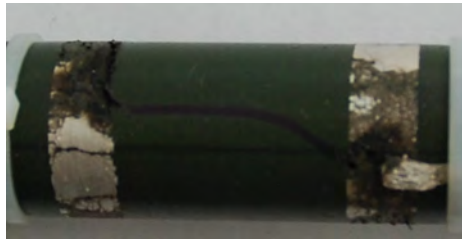


Abbildung C.6.: Durchschlagkanal des Prüflings MI-ee-2 (siehe Abschnitt 7.2.1.3)

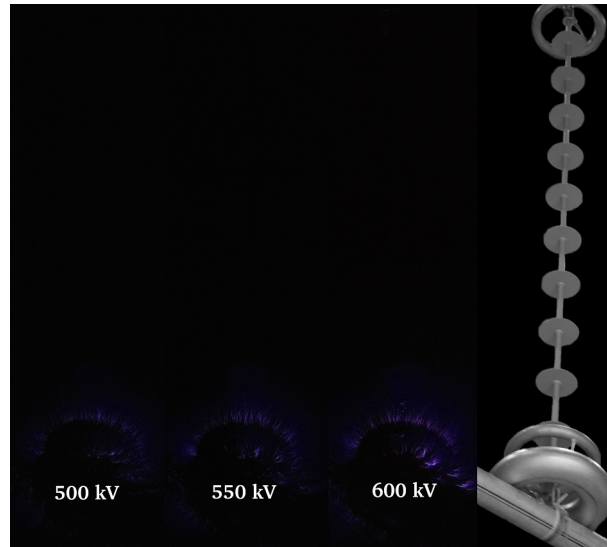


Abbildung C.7.: Entladungsentwicklung des Isolators 420m-k bei Wechselspannung unter künstlicher Beregnung; Ergänzung zu Abschnitt 7.2.3

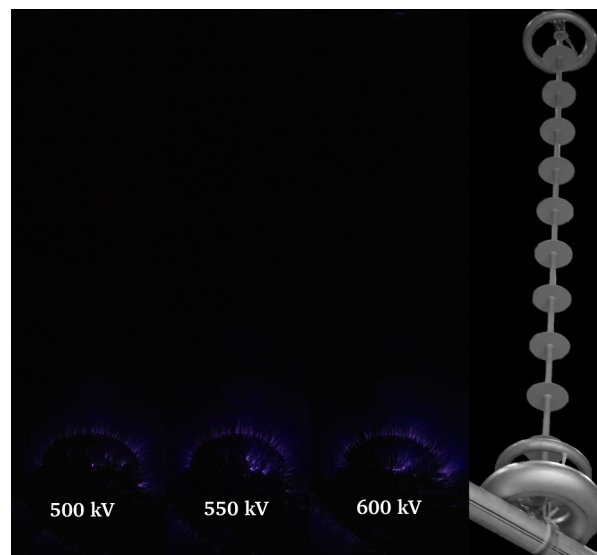


Abbildung C.8.: Entladungsentwicklung des Isolators 420DE bei Wechselspannung unter künstlicher Beregnung; Ergänzung zu Abschnitt 7.2.3

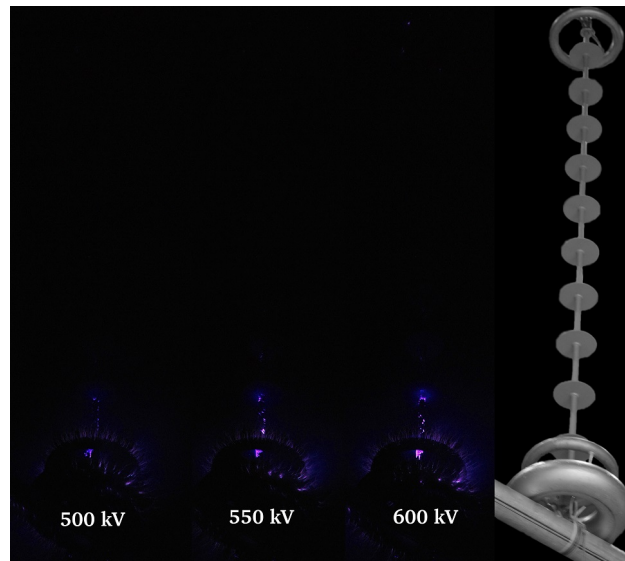


Abbildung C.9.: Entladungsentwicklung des Isolators 420m-mk bei Wechselspannung unter künstlicher Beregnung; Ergänzung zu Abschnitt 7.2.3

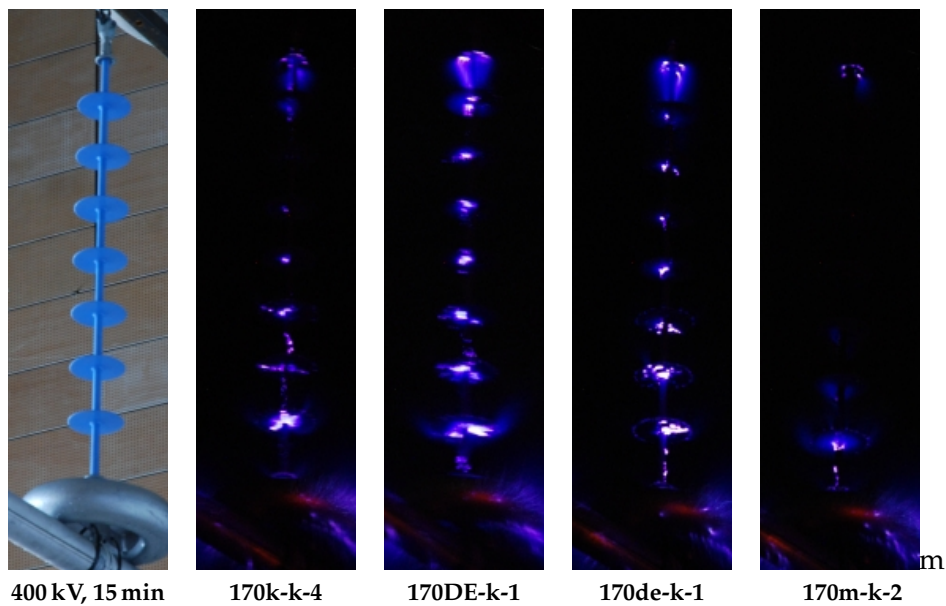


Abbildung C.10.: Ergänzung zu Abschnitt 7.2.4: Teilentladungen an Langstabisolatoren mit  $U_m = 170$  kV; Beregnungsdauer: 15 min,  $U_P = 400$  kV liegt nach 3 min an (Quelle: [Gie12])

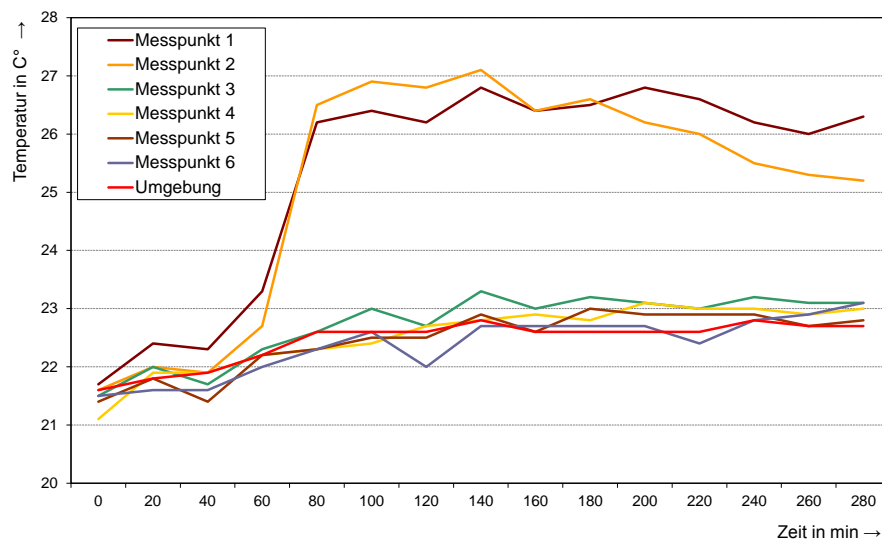


Abbildung C.11.: Zeitabhängige Erwärmung eines Isolators 170m-k-2 beschrieben in Abschnitt 7.2.5

### C.3. Ergänzendes Ergebnis zu Kapitel 8

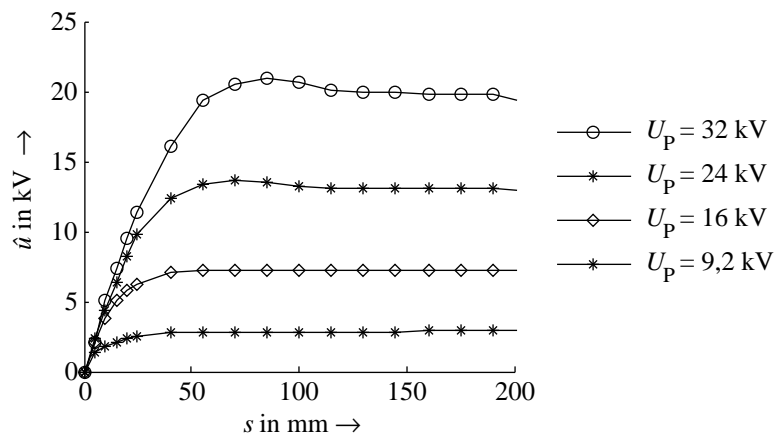


Abbildung C.12.: Ergänzung zu Abschnitt 8.2.1: Mit dem SSV am Prüfling 240-mVar aufgenommene Potentialverläufe; Mit zunehmender Spannung wird der ZnO-Lack resistiver

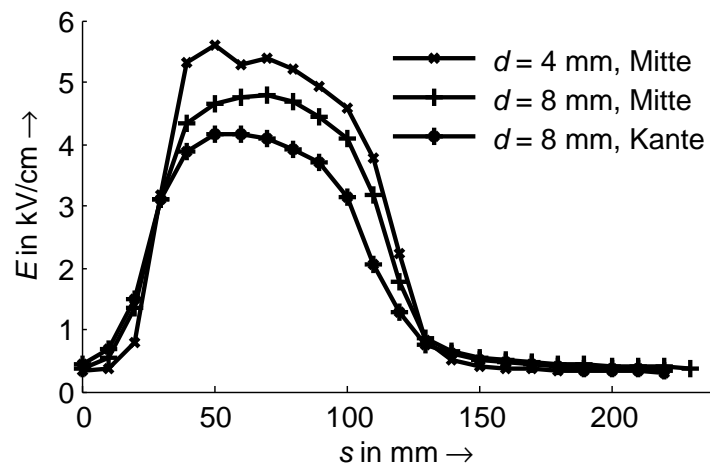


Abbildung C.13.: Ergänzung zu Abschnitt 8.2.1: Verläufe des elektrischen Feldes am Modellstab 240-mVar bei  $U_p = 33 \text{ kV}$ . Variiert werden der Abstand und die Position des Pockelssensors.

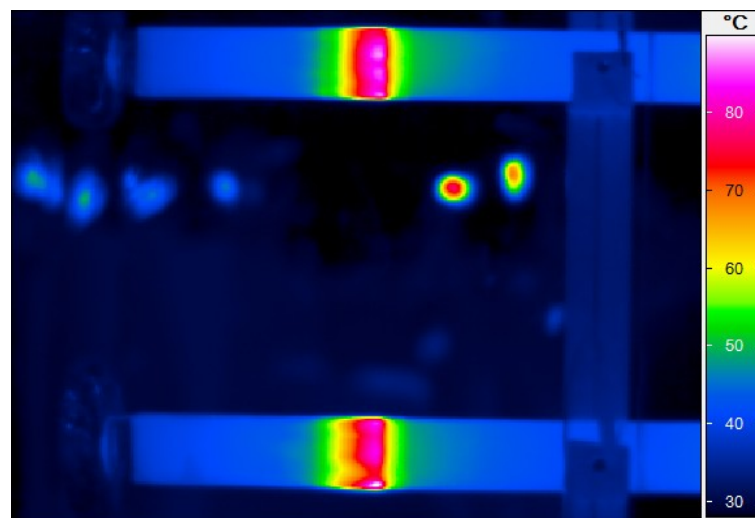


Abbildung C.14.: Ergänzung zu Abschnitt: 8.3: Beispiel einer IR-Messung mit der Kamera der Firma Infratec (siehe Tabelle B.6)

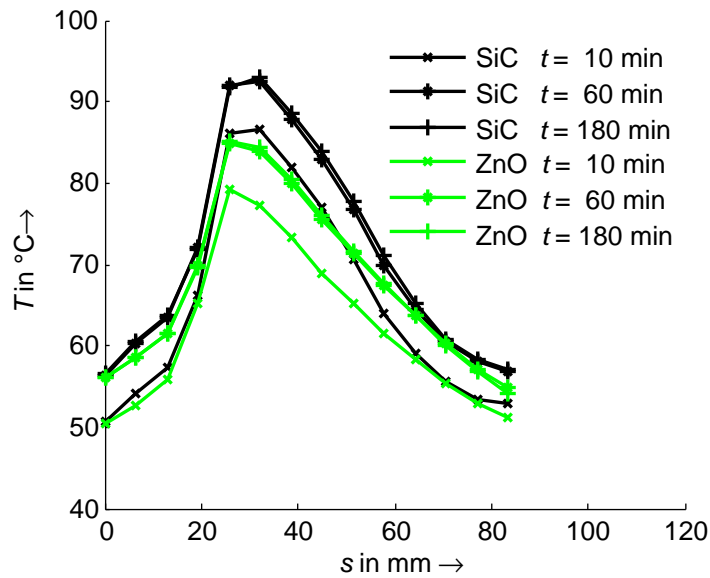


Abbildung C.15.: Ergänzung zu Abschnitt 8.3: Temperaturverteilung an 80-mVar und 80-SiC bei  $U = 40$  kV und  $T = 40$   $^{\circ}\text{C}$ . Die Stäbe sind übereinander angebracht, jedoch sind deren Positionen gegenüber der Messung in Abbildung 8.12 vertauscht. Die Aufnahmen erfolgten mit der Kamera der Marke Flir.

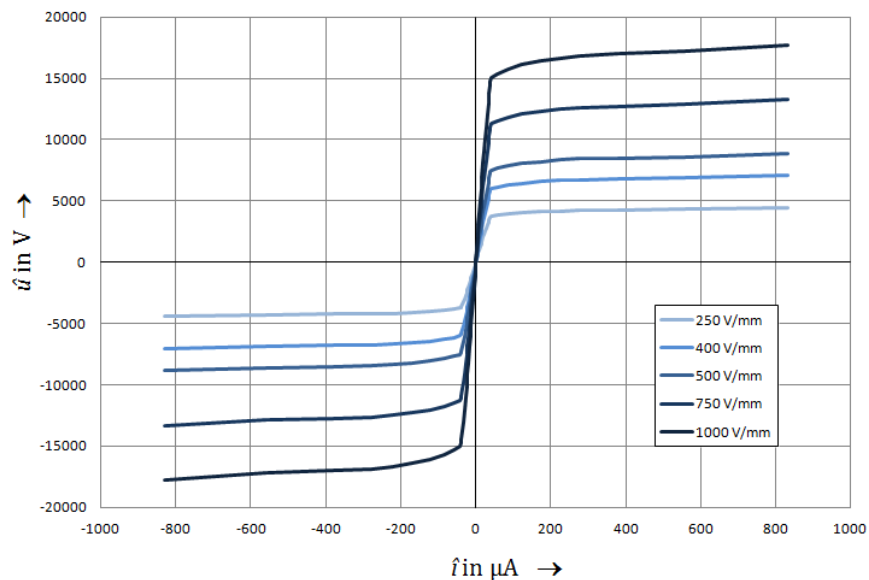


Abbildung C.16.: Variation der  $U - I$ -Kennlinien der in Abschnitt 8.2.2 simulierten Potentialverläufe (Quelle: [Jäg12]).

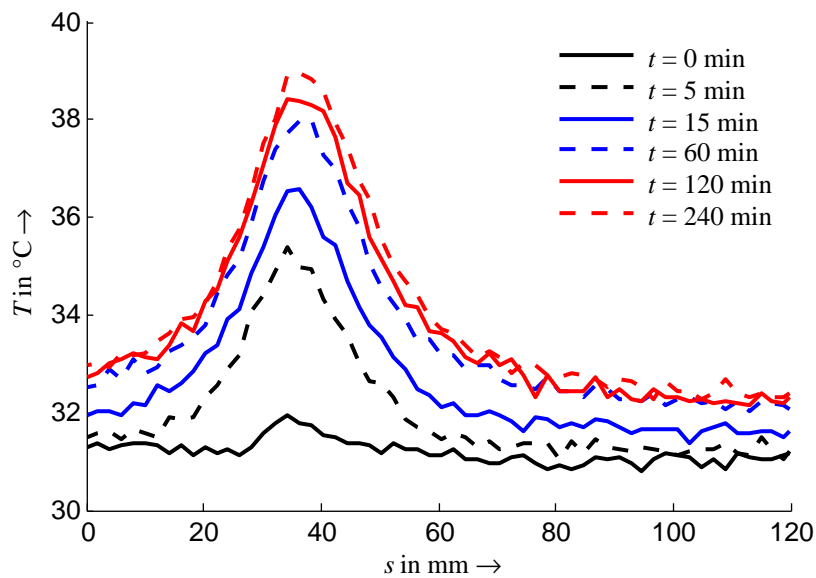
**C.4. Ergänzende Ergebnisse zu Kapitel 9**

Abbildung C.17.: Weiteres Ergebnis zu Abschnitt 9.4: Zeitabhängige Temperaturverläufe an einem konventionellen Feldsteuerschlauch der Länge  $l = 120$  mm bei  $U_P = 40$  kV

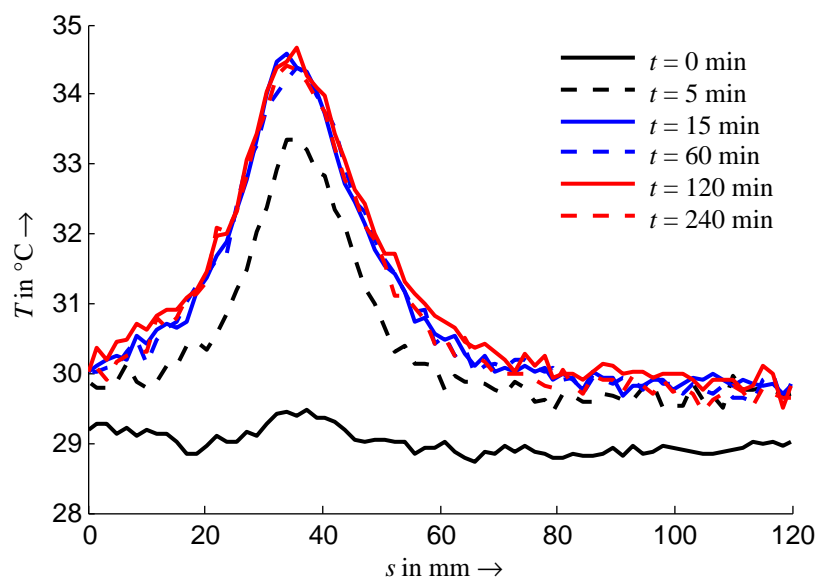


Abbildung C.18.: Weiteres Ergebnis zu Abschnitt 9.4: Zeitabhängige Temperaturverläufe an einem mikrovaristorgefüllten Feldsteuerschlauch der Länge  $l = 120$  mm bei  $U_P = 40$  kV



# Lebenslauf

Jan-Oliver Debus,  
geboren am 8. Dezember 1981  
in Haiger  
verheiratet



## Werdegang

Seit 06/2013	Entwicklungsingenieur bei der Brugg Kabel AG, Brugg
04/2008 bis 03/2013	Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Technischen Universität Darmstadt am Fachgebiet Hochspannungstechnik
10/2007 bis 03/2008	Diplomarbeit am Fachgebiet Hochspannungstechnik der Technischen Universität Darmstadt
10/2002 bis 04/2008	Studium der Elektrotechnik und Informationstechnik an der Technischen Universität Darmstadt
06/2001	Erlangung der allgemeinen Hochschulreife (Abitur) am Gymnasium Schloß Wittgenstein, Bad Laasphe

7. Juli 2014



## **Erklärung laut § 9 PromO**

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Dissertation allein und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur verfasst habe. Die Arbeit hat bisher noch nicht zu Prüfungszwecken gedient.

Darmstadt, 7. Juli 2014